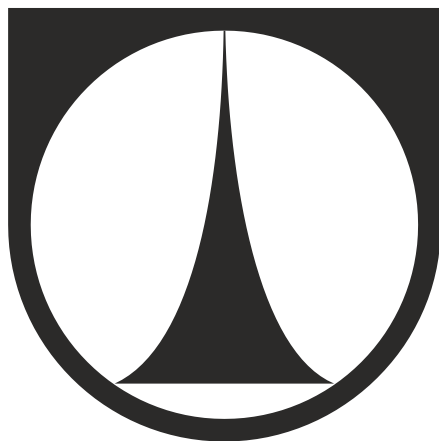


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Textilní fakulta



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Bc. Eliška Jírová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Textilní fakulta

Studijní program: **N 3106 – Textilní inženýrství**
Studijní obor: **Textilní technologie**

Využití technologie Airlaid pro přípravu filtrů spalin

Application of the Airlaid technology to the combustion filters creation

Autorka: Eliška Jírová, Bc.

Vedoucí práce: Ing. Jakub Hrůza, Ph.D.

Konzultant: Ing. Miroslava Rysová

Počet stran: 67

Počet příloh: 0

Datum odevzdání: 14. ledna 2013

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 14. ledna 2013

Bc. Eliška Jírová

Poděkování

Tímto způsobem bych chtěla velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jakubovi Hrůzovi, Ph.D za jeho zájem a odborné rady, konzultantce Ing. Miroslavě Rysové za její čas, podporu a podnětné připomínky. Mé díky patří i Filipovi Sanetrníkovi a Ing. Pavlovi Pokornému Ph.D za jejich pomoc a podporu při práci v poloprovoze KNT.

V neposlední řadě chci vyjádřit velkou vděčnost a díky svým rodičům a blízkým za jejich trpělivost, podporu a lásku.

Anotace

Cílem této práce je modifikace stroje Essediel- FIBERBLENDER, který složí k mísení vláken, na zařízení airlaid pro výrobu spalínových filtrů z recyklovaných uhlíkových a čedičových vláken. Práce se skládá ze dvou částí z teoretické a experimentální. V první části je všeobecně popsána filtrace, její druhy, typy filtrů, základní vlastnosti využívaných vláken a nejpoužívanější technologie při výrobě filtrů z netkaných textilií se zaměřením na airlaid.

V druhé, tedy experimentální části práce je popsán postup modifikace zřízení. Zásadní konstrukční změny se týkaly odsávacího zařízení, kondenzačního bubnu, natavení stroje, příváděcích a odváděcích pásů. Následovalo zhotovení vlákenné vrstvy z uhlíkových a čedičových vláken v různých poměrech. Po zpevnění rouna vpichováním se vzorky filtrů testovaly na prodyšnost, úlety a efektivitu filtrace, pro možnost zařazení do příslušné filtrační třídy.

Klíčová slova

airlaid,

filtrace

uhlíková vlákna

čedičová vlákna

spalínový filtr

Annotation

The objective of this diploma thesis is to modify the Essediel-FIBERBLANDER machine, used for fibre blending, to obtain airlaid equipment capable of making combustion filter from recycled carbon and basalt fibres. The diploma thesis consists of two parts – the theoretical one and the experiment. The first part is dedicated to the general problematic of filtration, filtration and filters types, fundamental properties of the manufactured fibres and the most common technologies used in nonwoven filters fabrication – with focus on airlaid technology. In the second part – which means the experimental part, the modification process is described in. The fundamental changes in construction were realized in suction equipment, condensing drum, and also in the modified machine settings and the input device and the output belt. Thereafter, fibrous layers of carbon and basalt fibre mixtures in different weight ratios were created. The additional mechanical bonding of the layers was realized via needle punching. Created filter media samples were tested for permeability, fibre drift, and filtration efficiency. According to the testing results, the filter media were ranked in the appropriate filtration class.

Key Words

Airlaid,

filtration,

carbon fibres,

basalt fibres,

combustion (hot gas)

filters.

Obsah

Úvod	6
1 REŠERŠNÍ ČÁST: Filtrace	7
1.1 Způsoby filtrace	8
1.1.1 Plošná filtrace	8
1.1.2 Hlubková filtrace	9
1.2 Mechanismy filtrace	9
1.3 Parametry filtrace	10
1.4 Filtrační vlastnosti	11
1.5 Filtrační materiály	13
1.6 Dělení podle dispersity prostředí	18
1.6.1 Kapalinová filtrace	18
1.6.2 Filtrace vzduchu	18
1.7 Filtrace horkých spalin	23
1.8 Technologie výroby vláknenných filtrů	24
1.8.1 Tkanina	25
1.8.2 Naplavované textilie	25
1.8.3 Vpichované textilie	25
1.8.4 Spun-bond	26
1.8.5 Melt-blown	27
1.8.6 Elektrostatické zvlákňování	28
1.8.7 Mykací stroj	28
1.8.8 Airlaid	29
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
2.1 Popis experimentu:	33
2.2 Vývoj laboratorního airlaid zařízení a optimalizace jeho parametrů	34
2.2.1 Polyamidová vlákna	35

2.2.2	Korekce proudění vzduchu - tah	36
2.2.3	Odváděcí ústrojí	36
2.2.4	Příváděcí ústrojí.....	37
2.2.5	Seřízení vzdálenosti podávacího a rozvolňovacího válečku	38
2.2.6	Regulace proudění vzduchu	38
2.3	Příprava série vzorků s definovanými parametry a měření jejich vlastností.	40
2.3.1	Testovací zařízení.....	40
2.3.2	<u>Ověřovací vzorky z Pa vláken</u>	43
2.3.3	Vzorky z uhlíkových a čedičových vláken	45
2.3.4	Úpravy stroje	49
2.3.5	Výroba vzorků.....	50
Závěr.....		61

Úvod

V dnešní době je stále více kladen důraz na ochranu životního prostředí. Ta nezahrnuje pouze řešení současného stavu, ale trendem je snaha o předcházení vzniku dalšího znečištění – vod, půdy a ovzduší. Čistota ovzduší je jedním z významných problémů dnešní doby. Současný špatný stav je zapříčiněn především spaliny vznikajícími v průmyslových výroбах, domácnostech a produkty dopravních prostředků. Z tohoto důvodu byla problematika znečištění ovzduší řešena legislativně od roku 1967. Systém kontroly ovzduší zahrnuje 3 důležité položky – volné ovzduší, ovzduší ve vnitřním prostředí a ovzduší v pracovním prostředí. Emisní a imisní limity jsou zde regulovány pomocí zákona o ochraně ovzduší 86/2002, nařízení vlády 350-354/2002 a vyhlášek MŽP ČR 355-358/2002. Tyto zákony jsou, vzhledem ke snaze o integraci naší legislativy s normami EU, v souladu především se směrnicí 96/62/ES o posuzování a řízení kvality ovzduší. Vzhledem k legislativním požadavkům na průmyslové odpadní produkty je vyvíjen tlak na zdokonalování stávajících filtračních materiálů a procesů a vývoj nových. Nové materiály jsou vyvíjeny jak z hlediska materiálového, tak i technologického. Materiály jsou voleny a modifikovány specificky dle konkrétních požadavků a aplikace – tedy dle teplotní a chemické stability, katalytických účinků, atd. Technologie výroby je volena právě dle zpracovávaného materiálu, ale například také na základě požadavků na izotropii vláken a tedy i vlastností. Jednou z těchto technologií, umožňující tvorbu izotropních materiálů vhodných pro výrobu filtrů, je technologie air-laid.

[1]

Právě touto technologií v kombinaci s materiály vhodnými pro filtraci spalin se zabývá tato diplomová práce.

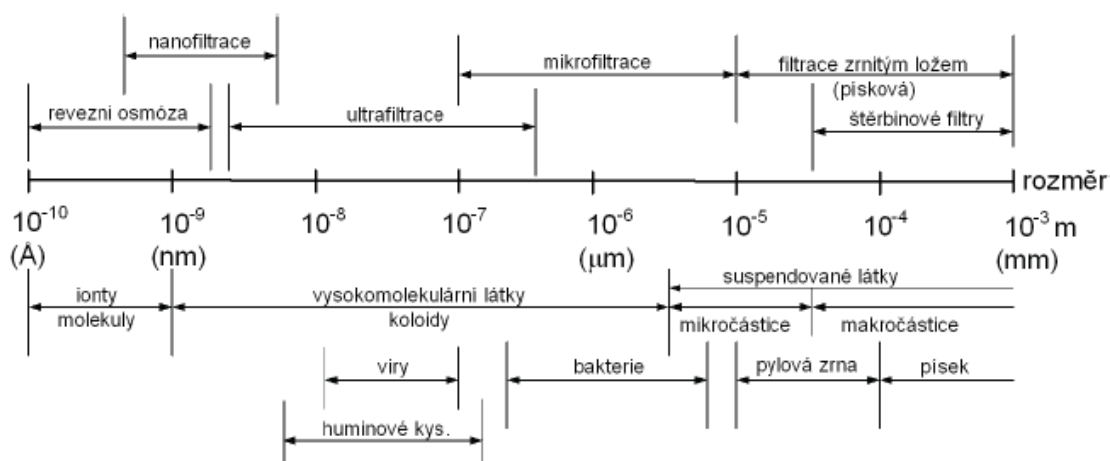
1 REŠERŠNÍ ČÁST: Filtrace

Pojem filtrace se používá pro označení procesu, při kterém dochází k separaci dispergovaných neboli nespojitých částic z disperzního prostředí pomocí porézního média – filtru. Pro výběr filtru pro daný filtrační proces je určující velikost a morfologie pórů ve filtru a velikost a tvar filtrovaných částic. Další proměnnou jsou fyzikálně-chemické vlastnosti jak disperzního prostředí, tak i filtrovaných částic. Disperzní prostředí může být plynné nebo kapalně - podle toho mluvíme o filtraci vzduchové nebo kapalinové. Zachycované dispergované částice mohou být dvojího skupenství - a to pevného nebo plynného. V průmyslu nachází filtrace velmi časté uplatnění při separaci pevných produktů od kapalin (filtrace cukerných krystalů), při separaci buněk mikroorganismů od kultivačního média, při odstraňování pevných nečistot z kapalin (filtrace nápojů v potravinářském průmyslu) až po čištění plynů (odstraňování popílku z plynných spalin).

Podle citlivosti filtru můžeme být filtrace označována jako:

- hrubá filtrace ($10^{-6} \text{ m} < dp$);
- mikrofiltraci ($10^{-7} < dp < 10^{-6}$);
- ultrafiltraci ($10^{-8} < dp < 10^{-7}$);
- nanofiltraci ($10^{-9} < dp < 10^{-8}$);
- reverzní osmózu ($dp < 10^{-9}$)

[11]

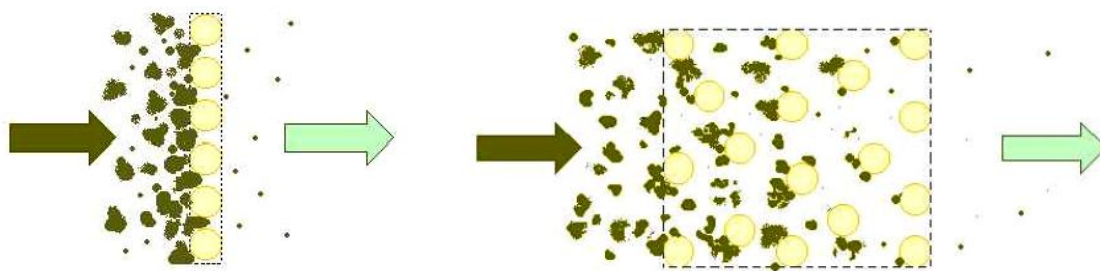


Obr. 1. Přehled tlakových membránových procesů. [4]

1.1 Způsoby filtrace

Z hlediska základního principu se technologie filtrace dělí na:

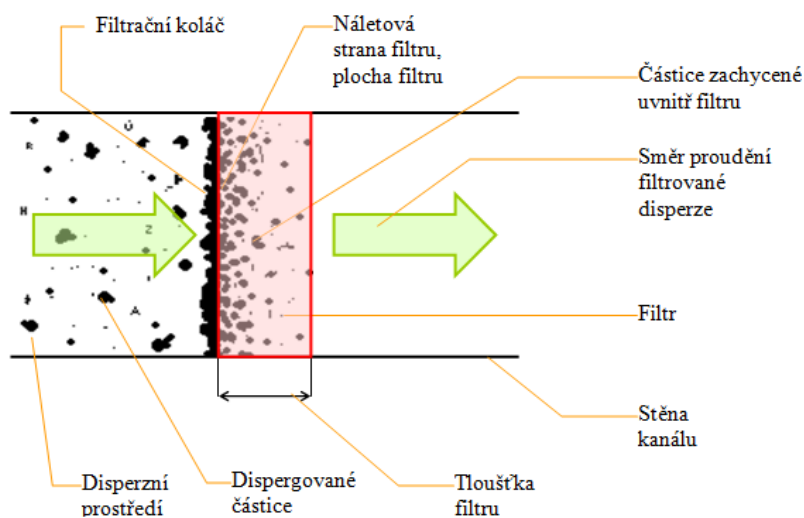
- Plošná filtrace
- Hloubková filtrace



Obr. č. 2. Povrchová filtrace a hloubková filtrace [11]

1.1.1 Plošná filtrace

Základním principem tohoto typu) filtrace je zachycování všech částic větších než jsou póry filtru (tzv. „síťový jev“). Filtrované částice jsou zachytávány na povrchu filtru, kde vytvářejí tzv. filtrační koláč, který sám o sobě tvoří filtrační vrstvu. Ta výrazně ovlivňuje průběh filtrace – dochází k zvyšování efektivity filtrace, snížení rychlosti filtrace a následně k ucpání filtru. Při znalosti velikosti pórů lze snadno určit, které částice budou filtrem zachyceny. Problematické je definovat velikost pórů, která se během procesu filtrace stále mění. Plošná filtrace je využívána u plynného (kabinový filtr, spalínový filtr) i kapalného (filtrace paliva, oleje) prostředí [11]



Obr. 3 Filtrační koláč[11]

1.1.2 Hloubková filtrace

Při hloubkové filtraci jsou částice zachycovány pomocí sil Van der Waalsových, elektrostatických a povrchových. Dochází tedy ke vzájemné fyzikálně-chemické interakci mezi zachycovanými částicemi a materiálem filtru. Díky působení těchto mezipovrchových sil je hloubkový filtr schopen zachytit řádově menší částice než jsou velikosti pórů. Uplatňuje se především při filtraci suspenzí s velmi nízkou koncentrací pevných částic (např. při čištění kapalin od zákalů, při odstranění prachu z chladicího vzduchu pro elektronická zařízení) [11]

1.2 Mechanismy filtrace

Při filtraci se, jak již bylo zmíněno, uplatňují různé mechanismy zachytu dispergovaných částic. Ty jsou vzájemně kombinovány dle struktury a vlastností filtru. [15]

- *Přímý záchyt*

Částice pohybující se shodně s tokem disperzního prostředí jsou zachyceny povrchem vlákna na vzdálenost rovnou jejímu poloměru.

- *Setrvačné usazení*

Částice vyznačující se velkou rychlostí a hmotností nejsou nesený vzdušnými proudnicemi a jsou zachytávány povrchem vlákna.

- *Elektrostatické usazení*

Náboj částic reaguje s nábojem vlákna. Dochází ke změně trajektorie částice k vláknu a tam je zachycena.

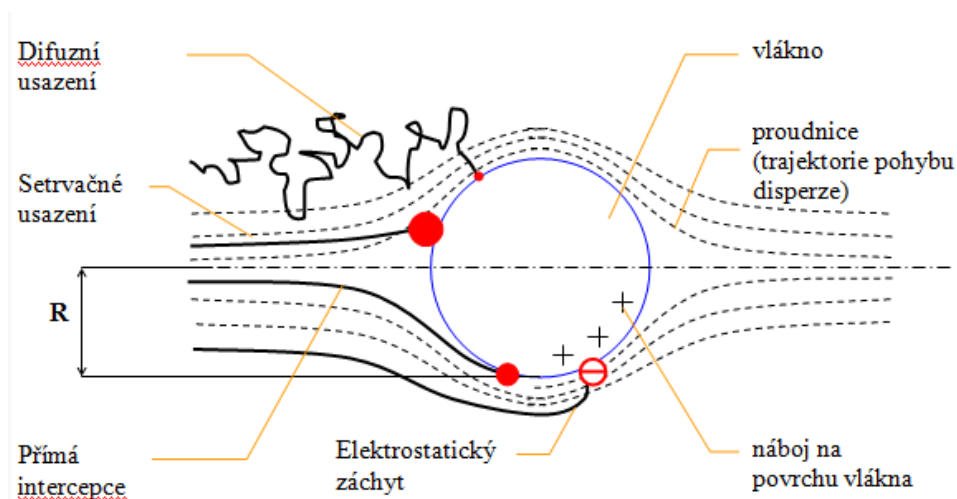
- *Difúzní usazení*

Malé a lehké částice v důsledku Brownova pohybu nekopírují vzdušné proudnice a dostávají se k povrchu vláken. Při klesání rychlosti filtrovaných částic dochází k jejich usazení/zachytu.

- *Sítový jev*

Všechny částice větší než je velikost póru filtru jsou zachyceny na jeho povrchu.

[15]



Obr.4 Mechanismy filtrace [11]

1.3 Parametry filtrace

Všechny parametry filtrace jsou proměnné a definují užité vlastnosti filtru a průběh samotné filtrace. Během filtrace se mění hodnoty filtračních vlastností vlivem zaplnění filtru a jsou uváděny podle potřeby použití. Parametry se posuzují z pohledu materiálu, filtrovaných částic a procesu filtrace.

[11]

Mezi parametry filtračních materiálů se řadí:

- plocha filtru;
- tloušťka filtru;
- plošná a objemová hmotnost filtru;
- stejnoměrnost materiálu;
- elektronická vodivost;
- parametry vláken (průměr, tvar, jemnost, orientace).

Z hlediska filtrovaných částic jsou relevantní následující vlastnosti:

- velikost částic disperzního podílu;
- distribuce velikosti částic disperzního podílu;
- koncentrace částic;
- tvar a povrch částic;
- objemová hmotnost částic;
- elektrické vlastnosti částic.

Pro proces filtrace jako takový jsou významnými parametry jako

- rychlost náletu částic;
- viskozita protékajícího média;
- teplota, tlak, vlhkost, ...

[11]

1.4 Filtrační vlastnosti

Efektivita filtrace

Jedná se o vyjádření poměru částic před filtrem a za filtrem. Zjišťuje se jaké množství částic je filtrem zachyceno. Čím vyšší efektivita, tím je filtr účinnější. Je definována vtažem $E = 1 - [G1/G2] \cdot 100$ (%), kdy G1 je množství částic za filtrem a G2 je celkové množství disperzního podílu. Efektivita se mění v průběhu filtrace v důsledku zanášení filtru částicemi. [5][11]

Tlakový spád

Je dán odporem filtru vůči toku disperzního prostředí. Je opakem prodyšnosti filtru. Cílem je velká efektivita filtru a nízkým tlakovým spádem. Ten je definován vztahem $p = p_1 - p_2$ (Pa) kde p_1 je tlakový spád před filtrem a p_2 za filtrem. Tlakový spád se v průběhu filtrace mění ze stejného důvodu jako efektivita. Růstem tlakového spádu je dána životnost filtru. Může dojít k poškození filtru, kdy poklesne jeho efektivita nebo k ucpání, kdy zachycené částice brání průchodu požadovaného objemu filtrovaného disperzního prostředí. [5][11]

Životnost filtru

Životnost filtru je dána množstvím částic, které je filtr schopen pojmout ještě před nárůstem tlakového spádu na definovanou/kritickou mez. Tento parametr ovlivňuje rychlost zanášení filtru a množství částic před filtrem. Počítá se tzv. jímavost filtru $J = E_s \cdot m_p$ kde E_s je střední hodnota efektivity a m_p množství částic nanesených na filtr okamžiku překročení mezního tlakového spádu. [5][11]

Prodyšnost

Jde o vlastnost porézního materiálu transportovat určité množství disperzního prostředí daným průřezem, tedy o množství tekutiny, které projde přes 1m^2 filtru za 1 minutu při definovaném tlakovém spádu. Výpočet prodyšnosti závisí na požadované přesnosti. [5][11]

Pórovitost

Tato vlastnost je definována procentuálním podílem objemu filtru nezaplněného vlákny. Určení velikosti pórů je závislé na metodě hodnocení. Při zjišťování největšího nebo průměrného póru je nejčastěji používána bublinková metoda měření, kde je předpokládán kruhový tvar póru. Mezi další metody určování velikosti pórů ve filtru patří kapalinová a rtuťová porozimetrie. [5][11]

Odolnost vůči vnějším vlivům

Při procesu filtrace mohou na filtr působit chemické, mechanické a teplotní vlivy, proti kterým je třeba filtr chránit, aby nesnížily jeho účinnost a životnost. Za tímto účelem je vlákenný materiál upravován dle potřeby. [5][11]

1.5 Filtrační materiály

Dělení filtračních materiálů je možné posuzovat z hlediska vnitřní morfologie na filtrační tkaniny, zrnité vrstvy a porézní hmoty. Nejpoužívanější jsou filtrační textilie, jsou vyráběny buď tkaním, nebo technologiemi pro netkané textilie. Využívané materiály jsou voleny podle prostředí, v němž jsou aplikovány, nejčastěji teplotou. Tabulka 1 ukazuje vlastnosti některých materiálů využívaných ke konstrukci filtrů. [7], [13]

Tab. 1. Tepelná a chemická stabilita vybraných vláken [6]

Typ vlákna	Hustota [kg/m ³]	Max. užitná teplota [°C]	Odolnost vůči			
			kyselinám	alkáliím	ox. činnidlům	Hydrolýze
Polypropylen	910	95	....	....	•	..
Polyetylen	950	85	....	....	•	..
Polyester (PBT)	1280	100	...	..	..	•
Polyester (PET)	1380	100	...	•	..	•
Polyamid 6.6	1140	110	•	...	•	•
Polyamid 11	1040	100	•	...	•	•
Polyamid 12	1020	100	•	...	•	•
PVDC	1700	85	....	...	....	...
PVDF	1780	100	....	....	...	....
PTFE	2100	150+	....	....	....	....
PPS	1370	150+	....	....	..	....
PVC	1370	80	....	....	..	....
PEEK	1300	150+	...	...	..	....
.... velmi dobrý ... dobrý .. slabý • velmi slabý						

Materiál použitý pro konstrukci filtru - Na základě morfologie (struktury) filtru

- ***Vrstva zrnitého materiálu***

Filtrační vrstva se vytváří naplávováním filtračního materiálu na podložku. O takto vyrobených filtrech se mluví jako o naplavovacích. Vrstvy zrnitého materiálu lze po filtraci snadno regenerovat nebo je lze z filtru odstranit propláchnutím. Používaný zrnitý materiál může být například písek, filtrační hlínky, aktivní uhlí...atd.

- ***Vrstva vláknitého materiálu***

Filtry vznikají nanášením na nosnou perforovanou podložku. Používají se vlákna skleněná, azbestová, celulózová, ze syntetických materiálů (polyamidy, polypropylen, expandovaný polytetrafluorethylen), z přírodních materiálů (vlna, bavlna) atd. Používají se také netkané vláknité materiály z textilních uhlíkových nebo grafitových vláken.

- ***Papírové materiály***

Jedná se o základní typ filtru pro laboratorní filtraci. Zároveň má široké uplatnění v průmyslu.

- ***Porézní kompaktní materiály***

Využívané materiály jsou porézní kovy, porézní sklo (frity) nebo keramika, která lze vyrobít v různých tvarech (desky, trubky, filtrační svíčky) a s řízenou porozitou a morfologií pórů a přizpůsobit je specifickým požadavkům filtračního procesu.

- ***Tkaniny***

Filtrační tkaniny jsou využívány v průmyslu. Po ukončení procesu filtrace je možné regenerovat je praním. Pro tyto filtry se využívají jak syntetické tak přírodní materiály.

- ***Perforované desky nebo síta***

Jsou vyráběny především z kovových, ale i syntetických polymerních materiálů. Konstruují se s velmi přesně definovanou velikostí, strukturou a morfologií pórů.

- ***Makroporézní filtrační membrány***

Využívají se například pro filtraci potravinářských produktů, v mikrobiologii a zdravotnictví. Vyráběny jsou ze syntetických polymerů. Jejich vlastnosti lze velmi snadno přizpůsobit požadavkům dané aplikace.

[13]

Základní vlastnosti filtračních materiálů:

- Struktura
- Pórovitost
- Jemnost
- Pevnost
- Tvárnost
- Tažnost
- Odolnost proti teplotě
- Fyzikálně-chemické stálosti

[13]

Vlákna**Čedičová vlákna**

Jedná se o anorganická vlákna, která jsou vyráběna z roztavené čedičové horniny neboli basaltu. Vlákna mají šedo-černou až černou barvu a vyznačují se svými výbornými termomechanickými vlastnostmi. Hlavní složkou čediče je oxid křemičitý (SiO_2) a podle jeho obsahu se čedič dělí do tří skupin.

- Alkalické čediče s obsahem oxidu křemičitého do 42%
- Slabě kyselé čediče s obsahem oxidu křemičitého 43 – 46%
- Kyselé čediče s obsahem oxidu křemičitého nad 46%

Pro výrobu čedičových vláken se využívají kyselé čediče. Zvlákňování probíhá při teplotě 1500 – 1700 °C. Při rychlém ochlazení vzniká sklovitá hmota, při pomalejším chlazení se tvoří krystaly ze směsi minerálů. Pro některé účely dochází k dloužení při teplotě 1300°C.

Čedičová vlákna mají vysokou tepelnou odolnost (700°C), mrazuvzdornost (až -260°C) a nízkou navlhavost. Díky svým mechanickým, fyzikálním a chemickým vlastnostem jsou předurčena pro užití v technické sféře. Surovina pro jejich výrobu není finančně náročná, je snadno dostupná.

[8]

Fyzikální vlastnosti

- Nízká hustota (při teplotě 20°C 2900kg/m³)
- Malá navlhavost (0,5%)
- Vysoký modul pružnosti v tahu (100 000 MPa)
- Pevnost v tahu (1850 – 2150 MPa)

[8]

Chemické vlastnosti

- Malý úbytek hmotnosti při hydrolýze
- dobrá odolnost proti vodě, většině alkálií, organickým a anorganickým kyselinám, organickým rozpouštědlům, většině chemikálií a jiným agresivním látkám

Tepelné vlastnosti

- dobrá tepelná odolnost, velký tepelný rozsah použitelnosti
- měrná tepelná vodivost – nízká
- nehořlavost a nízký obsah spalin

Další vlastnosti

- Specifický odpor (vysoký elektrický odpor)
- Výrazně eliminuje/pohlcuje zvuk
- Odolnost proti eroznímu prostředí, proti UV záření, proti plísním a jiným mikroorganismům

[8]

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se specifikují podle technologie jejich výroby. Vzhledem k tomu že uhlík netaje, není tažný a je odolný vůči rozpouštědlům nedají se vlákna vyrábět stejně jako například vlákna kovová, křemenná nebo vlákna polymerů. Uhlíková vlákna jsou vyráběna buď řízenou pyrolýzou organických prekurzorů, nebo katalytickým rozkladem uhlovodíků.

Vlákna nižší kvality bývají vyráběna ve formě vláken, textilií a plstí. Slouží především jako izolace, elektromagnetické stínění a výztuže do betonu. Nižší třída vláken je charakterizována pevností a prožností v tahu. Pevnost v tahu je nižší než 1000 MPa a modul pružnosti v tahu nižší než 100 GPa.

Vysokou kvalitu vláken je charakteristická pevnost v tahu 3,5 - 7 GPa a modul pružnosti 230 – 930 GPa. Do této skupiny spadají vlákna z mezofázových smol, vlákna charakteru whiskerů a vlákna na bázi PAN. Vlákna v této třídě se dále dělí na:

- Vysopepevná vlákna – standardně mají tato vlákna modul pružnosti v tahu 230 – 300 GPa a pevnost v tahu 3 - 4 GPa, přičemž novější vlákna o stejném modulu vykazují mnohem vyšší pevnost - až 7 GPa.
- Středně modulová vlákna mají modul pružnosti nad 290 GPa a pevnost vyšší než 4 GPa
- Vysokomodulová vlákna mají obvykle v tahu 2,4 – 4 GPa a modul elasticity 400 GPa
- Vlákna se super vysokým modulem dosahují stejných pevností v tahu jako vysokomodulová vlákna, ale modul elasticity přesahuje 550 GPa.

Za vysokou pevnost a tuhost uhlíkových vláken mohou aromatické roviny

[16], [28]

Recyklovaná uhlíková vlákna

Recyklovaná uhlíková vlákna se získávají tepelným rozkladem kompozitu. Rozklad je způsoben zavátím materiálu na teplotu kolem 550 °C. Doba a průběhu ohřevu je závislá na typu materiálu, způsobu výroby, obsahu výztuže a výdrži na teplotě. Po tomto procesu následuje postupné ochlazování na normální teplotu. [16], [28]

1.6 Dělení podle dispersity prostředí

- Kapalinová filtrace
- Filtrace vzduchu

1.6.1 Kapalinová filtrace

Vlivem velkých sil, které jsou v proudící kapalině je upřednostňován plošný způsob filtrace. Ostatní mechanismy jsou používány při snížení rychlosti toku nebo při turbulencích. U tohoto dispersního prostředí jsou kladeny vyšší nároky na mechanickou odolnost filtračního materiálu.

Aplikace: filtrace paliva, oleje, brzdové kapaliny, hydrauliky...

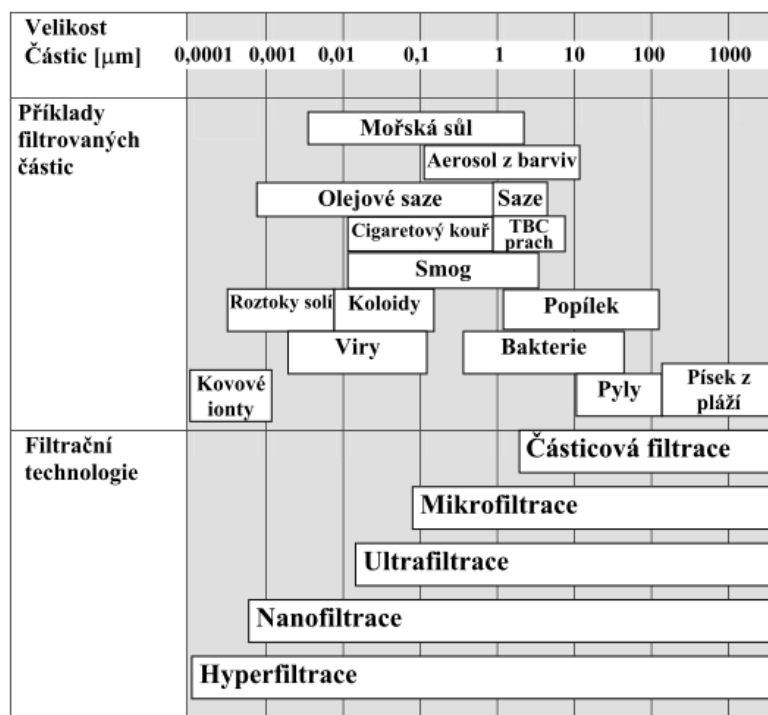
[9]

1.6.2 Filtrace vzduchu

V plynném disperzním prostředí se uplatňuje jak hloubkový, tak povrchový způsob filtrace v závislosti na filtračních parametrech. Posuzuje se zejména velikost částic (viz tabulka) a rychlost jejich pohybu. Filtry pro odlučování tuhých částic odpadních plynů se mohou dělit na filtry pro filtraci atmosférického vzduchu a na filtraci průmyslovou. Filtrace atmosférického vzduchu se provádí při větrání, klimatizaci a pro odprašování pracovního prostředí, kde je koncentrace prachu malá (řádově $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$). Při průmyslové filtraci je koncentrace zachycovaných částic bývá mnohem vyšší (řádově až v desítkách $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Při těchto podmínkách dochází k rychlému zanášení filtru, který je možné ve většině případů regenerovat (otřepávání, tlakový ráz vzduchu, zpětný tok vyčištěného plynu).

Aplikace: kabinové filtry, motorové vzduchové filtry, spalínové filtry...

[9]



Obr. 5 Přehled velikosti částic ve vzduchu[3]

Testování metody pro vzdušnou filtraci

Účinnost filtračního procesu se stanoví na základě zkušebních metod pro vzdušnou filtraci. Průběh testu, stejně jako testovací zařízení je stanovené normou. Podle výsledků těchto testů jsou filtry zařazeny do příslušných kategorií, které se dělí podle účinnosti filtru. Mezi testované vlastnosti patří například efektivita, dílčí efektivita pro jednotlivé velikosti částic, tlakový spád, vztah mezi tlakovým spádem a průtokem, životnost atd. Jednotlivé metody se liší typem filtrovaných částic, parametry procesu a způsobem detekce částic. Pro zařazení do kategorií se posuzuje velikost a typ částic a procentuální úspěšnost, s jakou jsou částice dané částice ve filtru zachyceny. Pro zjišťování velikosti póru ve filtru se používají další tzv. nepřímé metody (např. bublinková metoda, kapalinová porozimetrie, rtuťová porozimetrie...)

[9]

Typy zachycovaných částic a metody testování

- **syntetický prach**

Jedná se o částice prachu na bázi křemíku, které jsou většinou polydisperzní. Velikost částí se pohybuje od 0,2 do 10 μm . Tyto částice mohou být směřovány s organickými látkami jako jsou například saze a krátká celulózová vlákna. Zachycované částice jsou detekovány vážením prachu před a za filtrem. Tato testovací metoda se používá pro hrubé filtry třídy G, méně pro jemné filtry třídy F a pro předfiltry. Měření je vhodné pro sledování průběhu procesu filtrace a životnost filtru. Používané normy jsou EN 799 a ASHRAE 52,2. [9]

- **atmosférický prach**

Jednalo se o částice prachu ve vzduchu použité pro starší normy EN799. Pomocí počítače byla detekována velikost a množství částic před filtrem a za ním. Nyní na místo těchto částic používán aerosol DEHS se stabilnější kvalitou. [9]

- **olejové aerosoly**

Jedná se o částice olejů produkované rozprašováním. Nejznámější jsou DOP (dioctylphtalate), DEHS (diethylhexylsebacate) a parafinový olej. Olejové aerosoly se liší velikostí částic, podle teploty ve které jsou rozprašovány a sušeny na studené a horké. Rozsah velikosti částic je širší (polydisperzní aerosol), pokud je olej rozprašován a sušen za studena pomocí trysky Laskyn. Pokud je olej rozprašován a sušen za tepla, vznikají částice o velikosti 0,1 - 0,3 μm (monodisperzního aerosolu). Částice jsou detekovány pomocí laserového počítače, nebo spektroskopicky. U této technologie (s výjimkou parafinového oleje) je možné zjistit efektivitu zachycení určité velikosti částic. Díky tomu že částice nejsou citlivé na elektrostatický náboj, je možné zjistit nejhorší možné vlastnosti filtru. Pro měření HEPA filtru a ULPA filtru jsou používány počáteční hodnoty měření. [9]

- **NaCl aerosol**

Částice Chloridu sodného jsou rozprášeny a následně vysušeny. Při testu se tedy nejedná o aerosol. Tyto polydispersní částice mají střední velikost 0,65 μm (rozsah 0,02 - 2 μm). Zachytávané částice jsou zjišťovány spektroskopicky. Tato metoda je vhodná pro

testování respirátorů a testování jemných filtrů a HEPA filtrů. Používané normy jsou například BS 4400 a EN 143 [9]

Tab.2. Testovací procesy pro vzdušnou filtraci[3]

metoda	Název normy	Testovací materiál	Průměr částic	Technika přípravy test. Mat.	Detektor proniknuvších částic
DOP test	ASTM ASME/ANSI IES MIL-STD UL	Di-oktyl ftalát (syntetický olej)	0,3 0,2 – 0,3 monod.	Vypařování, kondenzace	Spektrofotometr Penetrometr Optický počítač částic
Test syntetický m prachem	ANSI/AHAM	Prach z Arizonských silnic	0,5 - 3	Aerosolový generátor	Aerodynamický třídíč částic
	ASHRAE EN CAN	72% fine dust 23% molocco black 5% cotton linters	-	Dávkovač prachu, injektor	vážením
	ISO SAE	Testovací prach	2 – 125 10 - 40	injektor	Vážením
Test atmosf. prachem	ASHRAE EN CAN	Atmosférický aerosol	Cca. 0,3	Přímo ze vzduchu	Opacitometr (propustnost světla)
Aerosolem NaCl	BS	Částice NaCl	0,02-2 medián 0,6	Rozprašení roztoku a vysušení	spektrofotometr
Methylene Blue test	BS	Částice metylenové modři	-	Rozprašování vodního roztoku	Velikost skvrny

Rozdělení vzduchový filtrů podle evropské normy

- G1-G2 - předfiltry, klimatizace
Vláknitý prach, částice větší 10µm
- G3-G4 -dopravní prostředky, garáže, obchodní domy...
pyl, zvířecí prach
- F5-F6 -školy, kanceláře, restaurace
částice proti výtrusům a bakteriím, málo účinné proti tabákovému kouři, sazím,
olejové mlže
- F7 -laboratoře, nemocniční pokoje, divadla
proti bakteriím, částečně proti tabákovému kouři a sazím

F8-F9	-operační sály, farmacie proti sazím, olejové mlze, kouři
EU10	-optické laboratoře, biologie, jaderné elektrárny veškeré aerosoly
EU11	-veškeré aerosoly a viry
EU12	biotechnologie
EU14	

[3]

	Filtreační třída				Odlučivost	
	DIN 24 185 DIN 24 184	ČSN EN 779	ON 12 5005	EUROVENT 4/5		
Hrubá filtrace	EU 1	G 1	A	EU 1	65% 80% 90%	A ... Odlučivost na syntetický prach
	EU 2	G 2	B	EU 2		
	EU 3	G 3		EU 3		
	EU 4	G 4		EU 4		
Jemná filtrace	EU 5	F 5	C	EU 5	40%	E ... Odlučivost na atmosferický prach
	EU 6	F 6		EU 6	60%	
	EU 7	F 7		EU 7	80%	
	EU 8	F 8		EU 8	90%	
	EU 9	F 9		EU 9	95%	

Obr.6. Rozdělení vzduchový filtrů podle evropské normy[3]

Spalinové filtry

Spalinové filtry mohou doplňovat, nebo nahrazovat funkci katalyzátorů. Zachycují pevné spaliny (popílek), plynné spaliny (oxid uhelnatý, oxid siřičitý) i aerosolové částice. Postupy čištění spalin je možné dělit na mokré, polosuché a suché. Filtrace může probíhat například pomocí technologie dediox (destrukce a zachycení částic), elektrofiltru (elektrostatické odlučování pevných částic), nebo praním (mokrý čištění). Často využívanou technologií je filtrace pomocí aktivního uhlí. Obvykle je u filtrace spalin nutné dodržovat minimální tlakový spád, jinak dochází ke snižování účinnosti funkce. [10], [11]

1.7 Filtrace horkých spalin

V řadě procesů jsou vyžadovány vysoké teploty filtrace. Vysoké teploty spalin přicházejících k filtrační jednotce zabraňují nežádoucí kondenzaci nebo desublimaci polutantů, což by vedlo k znečištění až úplné blokaci filtru. Jako filtrace při vysokých teplotách, nebo také filtrace horkých spalin je označován filtrační proces probíhající při teplotě 260 °C a vyšší. Běžné procesní teploty při tomto typu filtrace dosahují až 900 °C při tlaku až 8 MPa. Filtrovaný plyn většinou obsahuje nejen prachové částice různých rozměrů, ale také chemicky agresivní složky, oxidační a redukční činidla a pod. Tepelné vlastnosti spalin ovlivňující průběh filtrace

Při filtraci horkých spalin se také objevuje měkčení nebo také slinování prachových částic. Tyto jevy vedou k zanášení filtru a nestabilitě filtračního procesu. Teplota měknutí není konstantní a závisí na chemickém složení prachu. Například chloridy jako NaCl, KCl nebo CaCl_2 vedou ke snižování teploty měknutí. Z těchto důvodů jsou kladeny specifické požadavky z hlediska mechanické, chemické a tepelné stability na materiály určené k filtraci horkých spalin. Filtrační médium není odolné vůči vysokým teplotám a musí mít dostatečně vysokou mechanickou stabilitu. Filtrační médium musí být také dostatečně odolné vůči teplotním šokům a plynům jako jsou H_2S , HCl, NH_3 , Cl_2 a H_2O a vůči alkáliím. S rostoucí teplotou filtrace samozřejmě požadavky narůstají. Z mechanického hlediska hraje významnou roli vyšší tlakový spád a mechanický stres, který vyvolává zpětný puls (back pulsing). [17]

Media a elementy pro filtraci horkých spalin

Elementy pro spalinovou filtraci jsou běžně ve formě svíček s uzavřeným koncem (úzkých válců). Délka svíček se běžně pohybuje od 1 do 3 metrů a jejich vnější průměr od 60 do 150 mm. Kromě toho byly testovány například voštinové monolity.

Jako média se při filtraci spalin využívají porézní kovové struktury tvořené z kovových vláken nebo prášků. Netkané struktury bývají běžně formovány z krátkých kovových vláken o průměrech 2 - 40 μm . Porozita těchto struktur může dosahovat až 90 %. Filtrační média připravená z nerezové oceli mohou být aplikována až do teplot 420 °C. Pro tyto účely jsou využívány speciální slitiny jako Inconel 600, Monel nebo Hasteloy. Kromě kovových materiálů se využívají keramické materiály jako karbid křemíku nebo alumosikátová vlákna. Porozita keramických materiálů se pohybuje od 40 do 90 %. Teplotní odolnost keramických filtrů závisí na konkrétním použitém materiálu, ale může dosahovat až 1000 °C a více. Kromě toho se dnes vyskytují snahy o katalytickou filtraci spalin, která kromě odstraňování částic umožňuje také redukcí oxidů dusíku. Katalyzátory ve formě TiO_2 - V_2O_5 - WO_3 jsou potom zabudovávány do struktury filtru. Katalytická filtrace se běžně uplatňuje při teplotách 280 až 320 °C. [17]

Kromě zmíněných materiálů se pro filtraci spalin využívají také materiály jako polyimid, teflon, fluorokarbonové vlákna. Kromě toho jsou vyvíjeny filtrační materiály z čedičových vláken. Např. u kompozitních čedičových filtrů byla ověřena účinnost a stabilita při filtraci korozivních a odpadních plynů při teplotách až 800°C.

Z těchto důvodů se tedy filtrační média na bázi čedičových vláken a jejich kombinací s dalšími materiály jeví jako vhodná alternativa a inovace stávajících filtračních médií. [29]

1.8 Technologie výroby vláknenných filtrů

Pro tvorbu vláknenných filtrů se využívá široké spektrum textilních materiálů. Výrobní technologie určují vlastnosti filtru a následně jeho využití. Na filtraci se využívají tkaniny a netkné textilie, mezi ty patří naplavované textilie, vpichované textilie, spunbond, meltblown,

spunlace, objemné filtry kladené vzduchem - airlaid, mechanicky, termicky, nebo chemicky pojené, kolmo kladené textilie, kombinace a ostatní.

1.8.1 Tkanina

Tkanina je plošná textilie, která se tvoří vzájemným provázáním dvou, na sebe kolmých soustav nití – osnovy a útku. Je možné korigovat velikost póru a filtrační vlastnosti tkaniny volbou dostavy, vazby a použitých materiálů.

1.8.2 Naplavované textilie

Při výrobě se krátká vlákna rovnoměrně nanášejí ze zásobníku na pohyblivé síto. Způsob, jakým jsou vlákna nanášena na pás, ovlivňuje orientaci vláken výsledného materiálu (mají mírně vertikální orientaci, ačkoli patří do kategorie textilií s neorientovanou/náhodnou strukturou). Podtlakové čerpadlo odvádí přebytečnou vodu z textilie, která se tak vysuší. Netkané textilie vyrobené tímto způsobem se následně ještě zpevňují. [14]



Obr. 7. Mokrá technologie filtrace[14]

1.8.3 Vpichované textilie

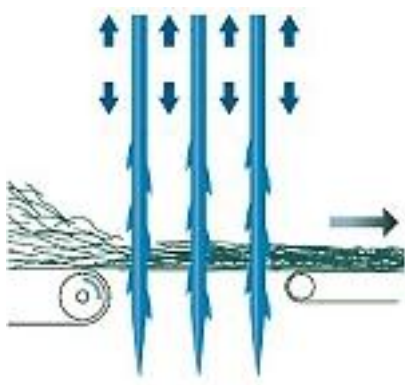
Podstatou vpichování je provazování vláknenné vrstvy svazky vláken vzniklými přeorientováním části vláken účinkem průniku jehel s ostny. Soudržnost textilie tedy spočívá ve tření mezi vlákny. Při deformaci textilie se vlákna přeorientovávají ve směru působící síly. Při tom se zvětšují jejich vzájemné třecí plochy a současně síla, kterou jsou k sobě

přitlačována. V průběhu vpichování dochází k podstatné redukci tloušťky vlákenné vrstvy, k výrazné změně orientace všech vláken a ke změnám šířky a délky útvaru.

Základními parametry procesu vpichování jsou:

- (a) počet vpichů na jednotku plochy textilie;
- (b) hloubka vpichu;
- (c) typ a způsob rozmístění vpichovacích jehel a
- (d) vlastnosti vláken (délka, jemnost, tahové a povrchové vlastnosti).

V průběhu procesu vpichování je vlákenná vrstva přiváděna vstupním zařízením mezi dva perforované rošty. Ty jsou od sebe běžně vzdáleny 40 až 60 mm a mají za úkol redukovat tloušťku výchozí vlákenné vrstvy, která může být až 250 mm. Otvory v roštích periodicky pronikají vpichovací jehly umístěné v jehelné desce. Ostny jehel zachytávají skupiny vláken vrstvy, přeorientovávají je kolmo k vrstvě a protahují vrstvou. Vrstva je posunována odtahovými válci po spodním roštu – tzv. opěrném. Při zpětném pohybu soustav jehel zabezpečí vrchní, tzv. stěrací rošt vysunutí jehel z vlákenné vrstvy. [12]



Obr.8. Výroba vpichované textilie [14]

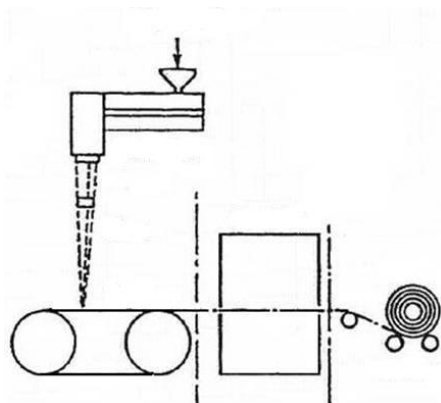


Obr.9. Zařízení pro vpichování textilií (používané v experimentu)

1.8.4 Spun-bond

Technologie je jednou z nejpoužívanějších pro výrobu netkaných textilií. Proces výroby začíná při tavení polymeru, který se předkládá ve formě granulátu. Tento proces je téměř

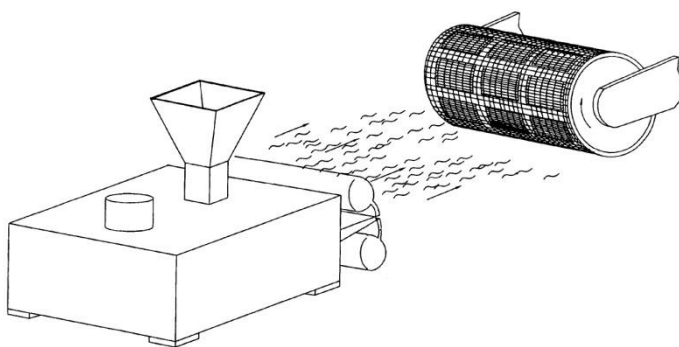
totožný s technologií výroby vláken z taveniny syntetických polymerů. Pomocí zvlákňovacích trysek dochází ke zvlákňování taveniny, ta se odtahuje a dochází k dloužení. Následně dochází k rozkládání filamentů na plochu pohybujícího se síťového dopravníku. Dále dochází ke zpevňování vlákenné vrstvy ořezání okrajů a navíjení hotové textilie. [14]



Obr.10 Schéma technologie spun-bond[18]

1.8.5 Melt-blown

Princip výroby netkané textilie pomocí technologie meltblown je založena na rozfoukávání taveniny polymeru na porézní pás. Stejně jako u technologie spunbond se proces výroby skládá z několika operací. Proces výroby začíná tavením polymeru a dopravy taveniny k hubici. Z taveniny se formují vlákna, která jsou následně strhávána proudem vzduchu. Po ochlazení se vlákenná vrstva formuje na porézním sběrném bubnu nebo pásu. Textilie je následně pojena (nejčastěji kalandrováním) a navíjena. [14]



Obr. 11. Schéma technologie melt-blown[19]

1.8.6 Elektrostatické zvlákňování

Technologie je založena na formování taveniny polymeru ve vlákna, působením silného elektrostatického pole. Vzniklá vlákna jsou vlivem působícího elektrostatického pole ukládána na podložku, nejčastěji na textilní materiál, pohybující se po povrchu protielektrody.



Obr.12. Elektrostatické zvlákňování[20]

1.8.7 Mykací stroj

Toto zařízení je zde zmíněno především pro podobnost s technologií airlaid. Hlavním cílem tohoto procesu je ojednocení vlákenné suroviny (rozvolnění chomáček vláken) a dodat vlákna v podobě rouna/pavučky.

V průběhu dochází k:

- odlučování nečistot a krátkých vláken
- částečnému napřimení vláken
- paralelnímu rovnání vláken
- mísení vlákenného materiálu
- zvýšení stejnoměrnosti vlákenného produktu

[21]

Mykací stroj Wirrvlies

Od klasického mykacího stroje se liší konstrukcí a funkcí snímacího válce. Snímací povlak válce se pohybuje proti směru pohybu tamburu (rychlostí 1500m/min). Vlivem rychlého protismykového pohybu povlaků v něm vzniká silné turbulentní proudění vzduchu. Zároveň s odstředivou silou působící na vlákna způsobuje proud vzduchu přenos části vláken na povrch snímacího válce s víceméně náhodnou orientací. [12]

1.8.8 Airlaid

Airlaid je jednou z metod výroby netkaných textilií. Jedná se o pneumatické, neboli aerodynamické vytváření vlákenné vrstvy, kdy dochází k ukládání ojednocených vláken rozptýlených ve vzduchu na kondenzační buben nebo síto. Tam jsou vlákna přiváděna kombinovaným účinkem odstředivé síly a proudem vzduchu, který může mít lamelární a turbulentní charakter. Proudění vzduchu má vliv na stejnoměrnost rouna a zároveň na celkovou produkci stroje. Technologie umožňuje výrobu vlákenné vrstvy jak na jednorázové účely tak pro trvalé výrobky. Jednorázové produkty (např. utěrky, dětské pleny, inkontinenční pomůcky, ženské vložky) obsahují převážně krátká vlákna. Pro trvanlivé výrobky (např. podšívky, automobilové součásti, filtrační média) jsou využívána delší vlákna. Charakteristickým rysem pro technologii airlaid, na rozdíl od mykání, je izotropické neboli náhodné uspořádání vláken ve vlákenné vrstvě. Technologie je velice všestranná z pohledu volby typu vláken a jejich specifikace. Zároveň jsou k dispozici různé konstrukční úpravy stroje pro větší variabilitu výroby. [2]

Princip metody

Vlákenná surovina je rozvolněna šhubacím válcem, který je opatřen pracovním povlakem. Kombinovaným účinkem odstředivé síly a přiváděného proudu jsou z něj vlákna snímána. Následně dochází k ukládání vláken na pohybující se síťový dopravník. [12]

výhody technologie

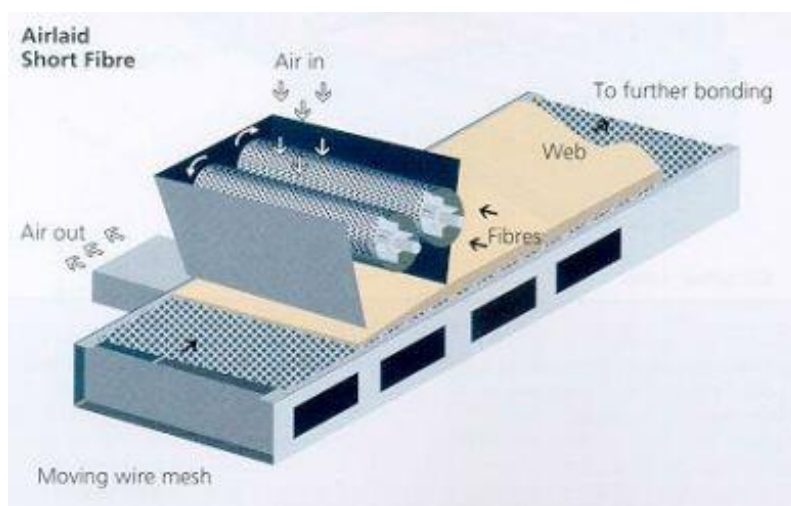
- izotropický charakter výchozí vlákenné vrstvy
- menší rozdíly v příčném a podélném směru
- široký rozsah plošných hmotností

- výroba objemných vrstev

Nevýhody technologie

- nízký stupeň ojednocení vláken (lze zvýšit při nižším dávkování)
- možnost zaplétání jednotlivých vláken (mrakovitost struktury)
- nerovnoměrné proudění vzduchu

Nevýhody limitují výkon zařízení. Pro jejich eliminaci je nutno pracovat s nízkou koncentrací vláken (rozmezí 0,003 - 0,02g vláken na 1m³ vzduchu) [12]



Obr.13. Technologie airlaid[22]

Délka vláken zpracovávaných touto technologií se pohybuje od 10 do 60mm. Kratší vlákna umožňují vyšší výrobní rychlosti (vyšší produktivita). Delší vlákna mají tendenci se zamotávat, proto vyžadují vyšší objem vzduchu tedy nižší hustotu vláken. Výhodou této technologie je široká škála zpracovatelných vláken, jako jsou například vlákna přírodní, celulózová, syntetická, skleněná, ocelová, uhlíková atd..

Vývoj technologie airlaid - historie

Nejstarší zmínky o prvotní podobě zařízení Airlaid se datují od roku 1940. Tehdy se jednalo o jedno z nejstarších aerodynamických zařízení Curalator Co (nyní zmodernizované Rando Machine Corporation). Začátkem roku 1950 je zaznamenán zvýšený zájem o zpracování

levných celulózových vláken touto suchou technologií firmami a organizacemi z mnoha zemí (Rusko, Finsko, Dánsko, Švédsko, Velká Británie, USA, Kanada, Japonsko...). Díky tomu jsou zpracovávány projekty a inovace, které vznikají paralelně ve jmenovaných zemích a dochází tak k rozvoji technologie. V polovině šedesátých let 20. století v Honolulu v Japonsku byly navrženy cigaretové filtry z celulózových vláken, které byly vyráběné pomocí technologie Airlaid (stále se jedná o původní zařízení). Další vývoj vedl k úpravě průmyslových linek, které vyráběly jednorázové ubrousky. Tyto dva produkty, s novými výrobními inovacemi a patenty (například v roce 1998 byl u nás ohlášen jeden z patentů na biologicky odbouratelný oboustranný filtr na cigarety), se do dnes produkují. Ve stejném období se společnost Scott Paper Company's zaměřila na rozvoj technologie s ohledem na zpracovatelnost syntetických vláken. Došlo tedy k modifikaci zařízení Rando na Dover, DE, na které bylo možné zpracovávat různá textilní vlákna. Toto zařízení stále používá společnost Procter a Gamble.

Vývoj technologie Airlaid, tak jak ji známe dnes, je datována až koncem 70. a začátkem 80. let. Klíčovou osobou pro rozvoj této technologie je dánský vynálezce Karel Kroyer. Ten vycházel z patentu finského vynálezce Hejta a z výrobní technologie pocházející z Japonska. Jeho záměrem bylo vylepšit vzhled a vlastnosti výsledného produktu. Zařízení sloužilo k výrobě papíru suchou cestou. Až v tomto období se technologie Airlaid stala komerčně úspěšnou. K dalšímu vývoji technologie přispěl i člen jeho týmu John Moesgaard vývojem rotačního bubnu. [23]

Současnost

Navzdory globální hospodářské krizi, poptávka po výrobcích zhotovených technologií airlaid stále roste, především proto, že nejčastěji zpracovávaná surovina (celulózová buničina) je biologicky odbouratelná, snadno dostupná a finančně nenáročná. Nejčastěji vyráběným produktem jsou ženské hygienické vložky (cca 40% celkové výroby), papírové utěrky, podložky pro potraviny nebo dětské plenky. Rostoucí zájem trhu je však i o nové směry vývoje technologie airlaid. Uplatnění nachází ve zdravotnictví (např. výrobky, které napomáhají hojení ran) v oděvním průmyslu (oblečení s chladičným účinkem - je využíváno v extrémně vysokých teplotách a zabraňuje tak teplotnímu šoku) a v oblasti filtračních médií. Výhodou této technologie je možnost zpracovávání různých druhů vláknenných surovin. Pro

výrobu uváděných produktů jsou používána jak přírodní, tak i syntetická vlákna, technologie umožňuje i kombinování různých druhů vláken. Výrobky mohou obsahovat i různé funkční prášky jako jsou například super-absorbční polymer (SAP), antibakteriální prášky, a prášky které pohlcují pachy. Rozvíjí se i aplikace, které mění vlastnosti jádra výchozí vlákenné vrstvy například extra savé, měkké a pružné vlákno (SAF) pro ženské vložky, dětské plenky a inkontinenční podložky. Mezi typické druhy airlaid netkaných textilií patří vazba airlaid obsahující celulózu lepené termoplasticky nebo prášky (TBAL), multi-TBAL s přidáním latexu jako lokálního práškového pojiva (pro zvýšení pevnosti za mokra) (MBAL), a airlaid textilie spojované bez přidání termoplastického nebo chemického pojiva díky vzniku přírodních vodíkových vazeb mezi celulóзовých vláken (HABL). [24]

Vybrané patenty

patent číslo 6195842

Inovace zařízení spočívá v kombinování technologie mykání a technologie airlaid. Předkládaná vlákna jsou rozfoukávána (technologie airlaid) a jednotlivě procházejí mykacím procesem na lůžko ze kterého jsou vlákna odstředivě nesena proudem vzduchu. Toto zařízení je schopné zpracovávat delší vlákna než zařízení airlaid. Dále je vylepšené zpracování stroje týkající se lepšího snímání vláken z airlaid zařízení a především odstředivého snímání vláken ze stroje mykacího. [25]

patent číslo 6267252

Tento patent se týká filtračního média. Jedná se airlaid kompozit, který je vyroben z celulóзовých vláken (dvousložková vlákna). Nový produkt vykazuje výhodné filtrační vlastnosti a výbornou fyzikální pevnost. Je složen ze tří vzájemně propojených vrstev. První a druhá složka je vyrobena z polymerů s podmínkou, že první polymerní vrstva se musí tavit při teplotě nižší než vrstva druhá. Mísení celulóзовé buničiny z dvousložkových vláken se provádí rovnoměrným rozptýlením v airlaid kompozitu. Následně je kompozit zahříván za takové teploty, kdy dochází k tavení první polymerní složky, která zpevňuje (lepí) všechny složky, poté dochází k ochlazení. [26]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Popis experimentu:

Hlavním cílem experimentu je vývoj laboratorního airlaid zařízení, optimalizace jeho parametrů, příprava série vzorků definovaných vláken a měření jejich vlastností. Experiment lze rozdělit do dvou částí.

1 Vývoj laboratorního airlaid zařízení a optimalizace jeho parametrů.

Jedná se modifikaci stroje, původně používaného k mísení vláken. Cílem této modifikace bylo sestavit zařízení Airlaid tak, aby bylo možné vytvořit vláknennou vrstvu z recyklovaných uhlíkových a čedičových vláken, která má sloužit k filtraci horkých spalin. První pokusy byly prováděny s polyamidovými vlákny pro jejich lepší zpracovatelnost a menší prašnost. Nejprve byly provedeny základní konstrukční změny zařízení a optimalizace parametrů, aby vůbec vytvářelo homogenní vláknennou vrstvu. Průběžné hodnocení výsledků bylo prováděno buď vizuálně, nebo měřením variability prodyšnosti získaných vrstev.

2 Příprava série vzorků s definovanými parametry a měření jejich vlastností.

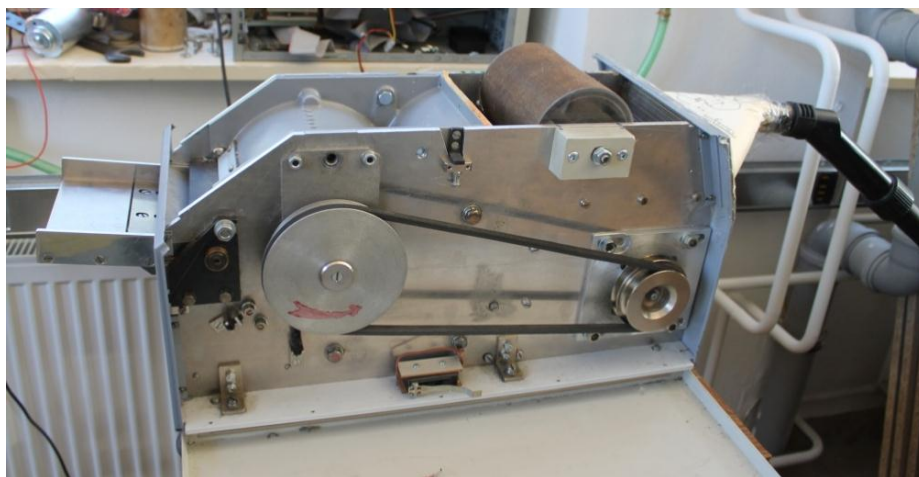
Vzorky byly připravovány z recyklovaných uhlíkových vláken a vláken čedičových o nižší kvalitě (vlákna pro tepelnou izolaci domů). Důvodem tohoto výběru je jejich tepelná odolnost pro předpokládanou filtraci horkých spalin a v případě čedičových vláken také nižší cena oproti vláknům uhlíkovým. Vlastnosti výsledných vzorků filtrů byly korigovány a optimalizovány poměrem vláken a jejich množstvím. Při zpracovávání docházelo k dalším konstrukčním úpravám a změnám systému Airlaid.

U připravených vzorků byly testovány níže uvedené parametry a vlastnosti:

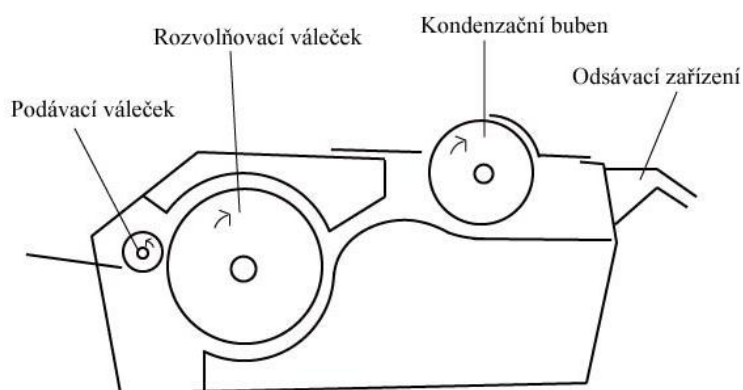
- a) Změna staplové délky uhlíkových vláken před a po průchodu strojem.
- b) Hmotová stejnoměrnost vzorků pomocí měření koeficientu prodyšnosti a jeho variability. Testování vzorků probíhalo na zařízení Metefem FF-12/A.
- c) Úlety vláken, nebo jejich částí při procesu filtrace. Tento jev byl simulován na zařízení DFT-4, které je jinak určeno pro měření filtračních vlastností hrubých filtrů.
- d) Filtrační efektivita (a tlakový spád) byla měřena pro rozsah testovacích částic od 120 nm do 500 nm. Měření probíhalo na přístroji MFP 1000 HEPA.

2.2 Vývoj laboratorního airlaid zařízení a optimalizace jeho parametrů

Modifikovaným strojem byl 'Essediel'-FIBERBLENDER, který slouží k mísení/směsování vlákenného materiálu. Na obrázku je znázorněn, již částečně pozměněný stav zařízení, který byl výchozí pro tuto práci. Provedené konstrukční změny spočívaly v přidání kondenzačního válce a odsávacího zařízení. Plánované úpravy se měly týkat kondenzačního bubnu (snímání výchozí vlákně vrstvy), vylepšení proudění vzduchu, příváděcího zařízení a dávkování vláken.

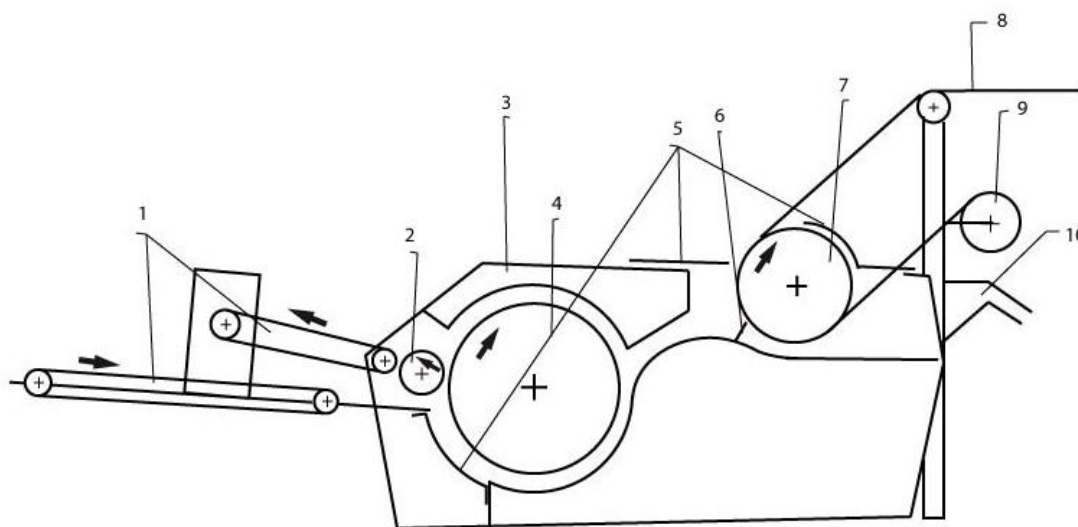


Obr. 14. Výchozí stav zařízení



Obr. 15. Schéma výchozího zařízení

Na následujícím schématu (obr. č. 15.) jsou zobrazeny všechny konstrukční změny původního zařízení (obr. č. 16.). Zdůvodnění konkrétních kroků je popsáno dále v textu.



Obr. 16. Schéma konečného stavu zařízení

- 1 příváděcí pásy
- 2 podávací váleček
- 3 kovový kryt na rozvolňovací váleček
- 4 rozvolňovací váleček
- 5 kryty pro lepší proudění vzduchu
- 6 gumová klapka
- 7 kondenzační váleček
- 8 zásobovací váleček pro podkladovou textilií (spun-bond)
- 9 výchozí vlákenná vrstva na podkladové textilií
- 10 odsávací zařízení

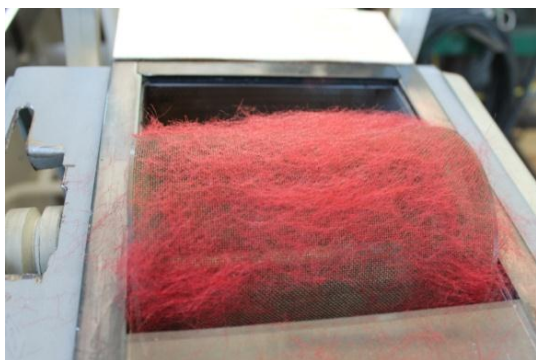
2.2.1 Polyamidová vlákna

Před prvními konstrukčními úpravami bylo nutné zjistit funkci a možnosti výchozího zařízení. Pro zpracování byla vybrána polyamidová vlákna (obchodní název Chemlon) z důvodu lepší zpracovatelnosti oproti vláknům uhlíkovým a čedičovým. Další parametr, který hrál roli ve výběru typu vlákenné suroviny byla volitelná staplová délka. I výrazná barevnost chemlonu byla záměrná. Nejednalo se pouze o dobrou viditelnost výsledné vlákenné vrstvy, ale i o

zjištění úniku či usazování vláken vlivem nesprávného proudění vzduchu ve stroji. Polyamidová vlákna nebyla před zpracováním nijak povrchově upravována, došlo pouze k jejich zkrácení na požadovanou délku 17mm a později 10 mm. Z těchto vláken byly vyrobeny i první série vzorků.

2.2.2 Korekce proudění vzduchu - tah

Dávkování vláken do stroje bylo prováděno ručně, stejně tak jako otáčení kondenzačního válce. Ten byl posunován s ohledem na množství přiváděných vláken, tak aby výsledná pavučinka byla co nejrovnoměrnější. Při minimálních hodnotách tahu odsávacího zařízení byla výchozí vlákenná vrstva (Obr.č. 17.) tvořena poměrně snadno a rovnoměrně bez kumulování vláken. Pro druhou variantu se tah zařízení posunul na maximum. V tomto případě docházelo k hromadění vláken na určitých místech a k jejich úniku. Vrstva byla výrazně nerovnoměrná (Obr. č. 18). Na základě tohoto testu byl při zpracovávání polyamidových vláken volen vždy nejnižší možný tah odsávacího zařízení.



Obr. 17. Vrstva tvořená při minimálním tahu



Obr. 18. Vrstva tvořená při maximálním tahu

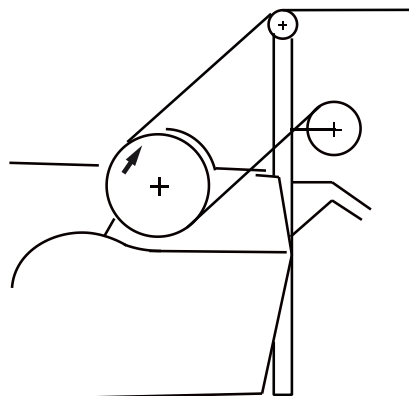
2.2.3 Odváděcí ústrojí

U předchozího testu vznikl problém se snímáním pavučinky z kondenzačního bubnu, kdy nebylo možné pavučinku sejmout tak, aby na bubnu nezůstávalo velké množství vláken. Z toho důvodu byly provedeny změny odváděcího ústrojí. Přes kondenzační válec byl napnut

pás netkané textilie vyrobené technologií spun-bond s antistatickou úpravou povrchu (Obr. č. 19). Ten měl zajišťovat lepší snímatelnost vláknenné vrstvy z netkané textilie. Při ručním snímání však stále docházelo k deformaci pavučinky. Aby se vrstva nemusela přesouvat z odváděcího pásu, protáhl se pruh podkladové textilie pod kondenzačním bubnem tak, aby bylo možné ho posouvat a odstříhávat rovnou s vytvořenou vláknennou vrstvou (Obr. č. 20.). Vzorek byl i s podkladovou textilií zpevněn vpichováním, a to při hloubce vpichu 8 mm.



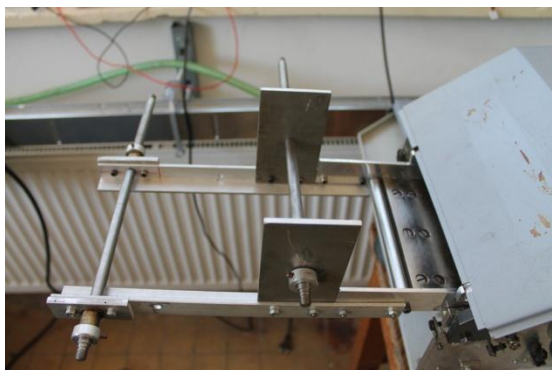
Obr. 19. Odváděcí pás



Obr. 20., Schéma odváděcího pásu

2.2.4 Příváděcí ústrojí

Další konstrukční úprava řeší problém s nevyhovujícím ručním dávkováním vláken do stroje. Kovová destička, na kterou se dosud kladla vlákna, byla odstraněna a na místo ní byla zkonstruována kovová kostra pro příváděcí pásy (obr. č. 21.). Na vytvořenou kostru jsou nataženy pásy netkané textilie (totožný materiál jako je na páse odváděcím viz obr. č. 22.). Spodní pás slouží k rovnoměrnému rozložení a posunu vláken do stroje. Vrchní pás plní funkci jakéhosi přítlačného a krycího ústrojí a zamezuje jejich hromadění před vstupem do stroje. Pásy jsou zpočátku poháněny ručně, což způsobuje nerovnoměrný přísun vláken. Tento problém je následně řešen řemeny, které jsou protaženy k hlavní hřídeli, tak aby se pásy pohybovaly kontinuálně a zároveň se zajistila vyhovující rychlost příváděcích pásů.



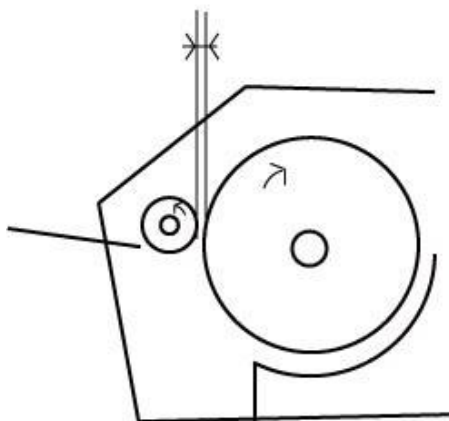
Obr. 21. Kovová konstrukce



Obr. 22. Přiváděcí pásy

2.2.5 Seřízení vzdálenosti podávacího a rozvolňovacího válečku

Postup vláken dále do stoje je ovlivněn vzdáleností podávacího (Obr. 23.) a rozvolňovacího válečku. Pokud je prostor příliš velký, vlákna neprocházejí až k rozvolňovacímu válci, propadávají a hromadí se pod ním. Příliš malý prostor mezi válci by zabránil postupu vláken a docházelo by k jejich hromadění před podávacím válečkem. Korekce bylo nutné provádět průběžně podle množství, délky a typu vláken.



Obr. 23. Místo korekce

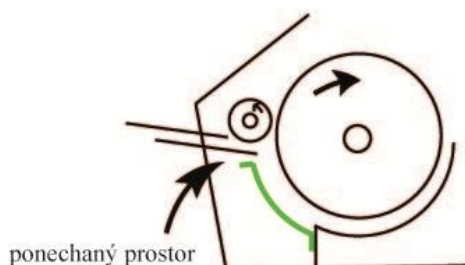


Obr. 24. Podávací váleček

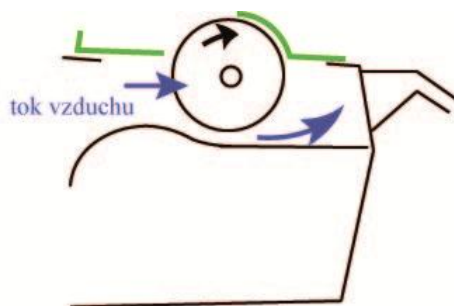
2.2.6 Regulace proudění vzduchu

Pro správnou tvorbu vlákněné vrstvy je nutné zajistit optimální proudění vzduchu. Vlákná musí být nesena strojem tak, aby nedocházelo ke ztratám, nebo kumulování vláken v prostorách stroje. Při usazování vláken na kondenzační buben, respektive na podkladovou

textilii musí být zajištěn správný směr proudění. V opačném případě dochází k víření vláken, které způsobuje nerovnoměrnou tvorbu pavučinky nebo znatelný únik vlákenné suroviny. Při spuštění stroje docházelo k výše uvedeným problémům, v důsledku konstrukčních vad. Problematická místa byla pod rozvolňovacím válcem, kde byl zcela otevřený prostor stejně jako v okolí kondenzačního bubnu, kde bylo třeba dořešit proudění vzduchu. V prvním případě byl problém vyřešen výrobou plechového krytu, který kopíroval tvar válce. Při provozu stroje se zkoumal vliv umístění krytu na výslednou vlákennou vrstvu. Ukázalo se že je třeba ponechat malý otvor nad krytem pro lepší proudění vzduchu. Po této úpravě byla vlákna nesena požadovaným směrem. Druhý problém se týkal prostoru okolo kondenzačního bubnu. Tam nedocházelo ke správnému nasměrování toku vzduchu. V těchto místech bylo třeba ponechat snadnou dostupnost k bubnu a podkladové textilii. Do prostoru před bubnem byl umístěn posuvný kryt z umělé hmoty, pohybem krytu je možné korigovat tvorbu pavučinky. V prostoru za bubnem nesměl kryt zamezovat pohybu kondenzačního válce a zároveň musel co nejlépe izolovat toto místo. Pro popsání účel byla vyhovující papírová krytka (měkký karton). Modelace tvaru i manipulace s ní byla velmi snadná a účinná. Na obrázcích číslo 25 a 26 jsou zeleně znázorněny konstrukční úpravy modifikovaného zařízení.



Obr. 25. Pevný kryt



Obr. 26. Pohyblivé kryty

2.3 Příprava série vzorků s definovanými parametry a měření jejich vlastností.

2.3.1 Testovací zařízení

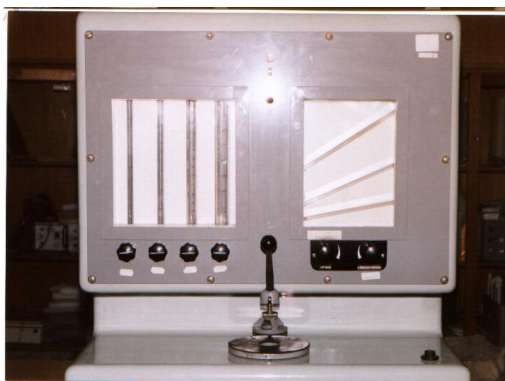
K vyhodnocení zhotovených vzorků je třeba na nich provést testovací měření. U vzorků z polyamidových vláken byla měřena pouze prodyšnost na zařízení Metefam-FF-12/A. U vzorků z uhlíkových a čedičových vláken byla měřena prodyšnost (Metefam-FF-12/A), úlety (DFT - 4) a účinnost filtrace (MFP 1000 HEPA).

Metefem FF-12/A

Podstatou zkoušky je měření množství vzduchu, který prochází mezi protilehlými plochami textilie, vztažené k času a testované ploše a měřené při standardizovaném tlakovém spádu (obvykle 20 mm H₂O). [27]

Tab. 3. Parametry měření na Metefem FF-12/A[27]

Parametry	Hodnota	Jednotka
Norma	EDANA 140.1; DIN 53887 – 1977; ČSN EN ISO 9237 (800817)	
Rozsah průtoku	4 – 5000	l/hod
Rozsah tlakového spádu	10 - 500	Pa
Velikost vzorku	10 - 100	cm ²



Obr. 27. Zařízení Metefem FF-12/A[27]

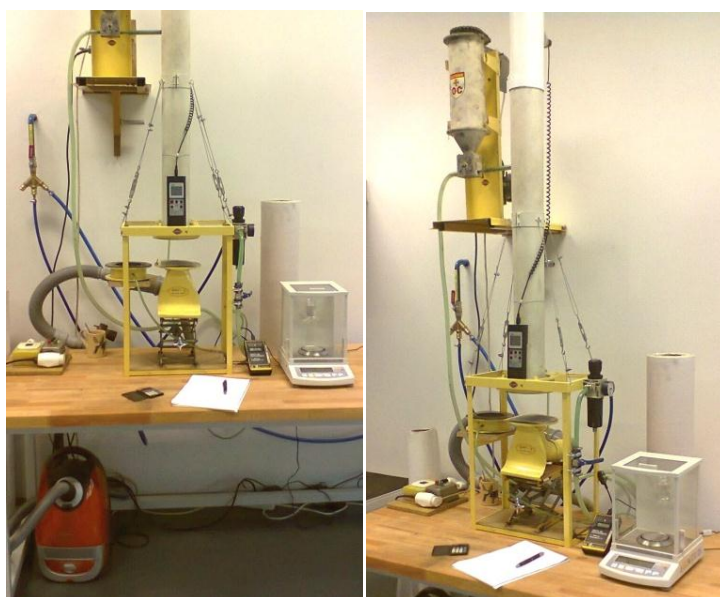
DFT – 4

Na přístroji DFT - 4 lze testovat odlučivost syntetického prachu, tlakový spád, náletovou rychlost vzduchu pronikajícího filtrem, celkové množství prachu zachyceného filtrem během testu (souvisí s životností filtru) a změny uvedených vlastností v průběhu procesu filtrace.

[27]

Tab. 4. Parametry měření na DFT – 4[27]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Norma	EN 779 (částečně)	
Tlakový spád	10 - 2000	Pa
Rychlost proudění	0,6 – 2,5	m/sec
Typ částic	ASHRAE	
Koncentrace částic	70	mg/m ³
Velikost částic	0,4 - 10	μm
Velikost vzorku	100	cm ²



Obr. 28. Zařízení DFT – 4[27]

MFP 1000 HEPA

Metoda umožňuje měření vlastností vysoce účinných částicových filtrů vzduchu. Měření umožňuje stanovení distribuce velikostí zachycených částic a účinnost zachytu nejhůře zachytitelných částic. Jako testovací částice mohou být použity pevné látky (NaCl, KCl...), nebo kapaliny (DEHS...). Primárně je metoda určena pro zjišťování počátečních charakteristik filtrace, za určitých podmínek lze testovat i jejich změnu v čase. [27]

Tab. 5. Parametry měření na MFP 1000 HEPA[27]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Norma	EN 1822	
Velikost částic	120-2000	nm
Typ částic	běžně DEHS, nebo NaCl	
Rychlost proudění	0,5 - 16	m ³ /hod
Tlakový spád	10 - 2500	Pa
Velikost vzorku	100	cm ²



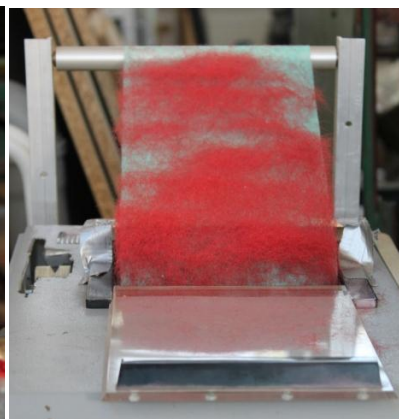
Obr. 29. Zařízení MFP 1000 HEPA[27]

2.3.2 Ověřovací vzorky z PA vláken

Během provádění konstrukčních změn byly vyráběny zkušební vzorky. Pro jejich výrobu byla použita již zmíněná polyamidová vlákna. Vzorky sloužily jak k testování upravovaného zařízení, tak ke zkoumání možných parametrů vlákenné suroviny. Bylo zhotoveno 6 sérií po 4 vzorcích. V každé sérii se na plochu (na příváděcí pás) o rozměrech 13 x 13 mm rozložila navážená vrstva vláken (obr 30), hmotnost rozkládané vlákenné suroviny se pohybovalo od 1,40g do 1,90g. Záměrem tohoto vážení bylo zjistit, jaký vliv má množství suroviny před strojem na vlastnosti a kvalitu výchozí vlákenné vrstvy. Ukázalo se, že hustota vláken před podávacím válečkem, která odpovídala váze 1,80 g (na plochu 13 x13 mm) a výš stroj nebyl schopný zpracovávat. Docházelo k hromadění vláken před vstupem do stroje nebo k ucpávání zařízení. Z množství vláken pod 1,40 g nebylo možné vyrobit dostatečně velký vzorek. Jako vyhovující se ukázalo množství vláken kladených na příváděcí pás o hmotnosti od 1,40 g po 1,70 g na popisovanou plochu. Pavučinky byly poměrně rovnoměrné a nedocházelo ke komplikacím při jejich výrobě. Na obr 31 je ukázána jedna z vytvořených vlákenných vrstev. Všechny se i s podkladovou textilií zpevňovali vpichováním.



Obr. 30. Rozložená vlákna před vstupem do stroje



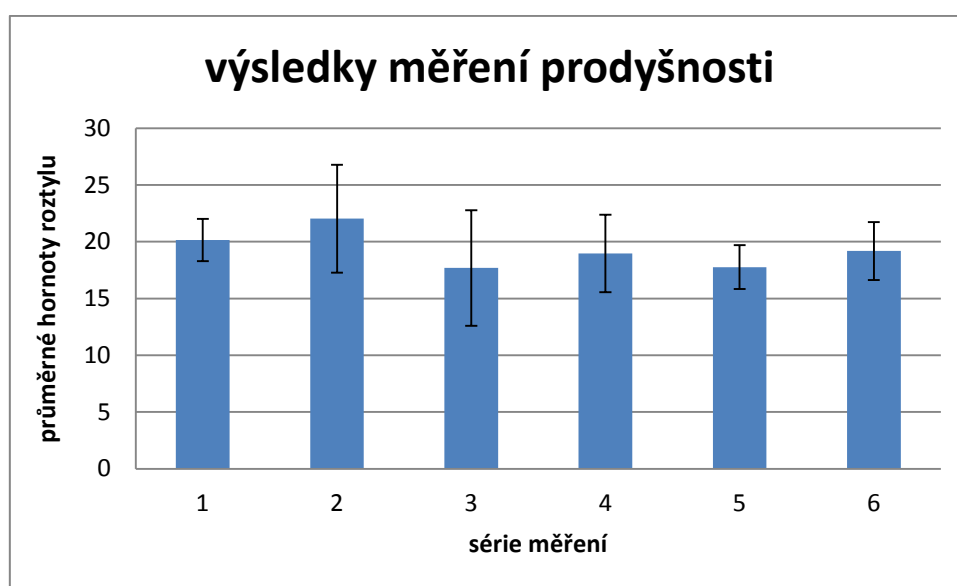
Obr. 31. Výchozí pavučinka

U připravených vzorků se testovala prodyšnost na zařízení Metefem FF-12/A. Ta měla ukázat jak velký vliv na výslednou vlákennou vrstvu má množství přiváděných vláken. U každého vzorku bylo provedeno 9 měření na různých místech (tab 7). Z těchto hodnot byly vypočítány rozptyly, průměry rozptylů a směrodatné odchylky (tab 6). Výsledky měření nepoukazovali na žádný významný trend, jak je vidět na grafu č.1. Znamená to, že přesné dávkování vláken

na vyměřenou plochu nehraje významnou roli pro rovnoměrnost výsledné vlákenné vrstvy. Záleží pouze na tom, aby byla vlákna rovnoměrně rozprostřena před podávací váleček v takovém množství, které zajistí dostatečnou hustotu vzorku a přitom nebude působit problém při jejich zpracování.

Tab. 6. Průměrné výsledky měření prodyšnosti

Měření	1.série	2.série	3.série	4.série	5.série	6.série
Průměr	20,158	22,030	17,689	18,971	17,759	19,178
Směrodatná odchylka	1,863	4,757	5,091	3,418	1,930	2,555



Graf 1 Znáznornění rozptylů prodyšnosti

Výsledky měření prodyšnosti

Tab. 7. Výsledky měření jednotlivých vzorků

	1.série										rozptyl
měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1.vzorek	2900	1850	1700	3200	1700	2700	2700	2700	2300		22,84183
2.vzorek	3550	3450	2400	3100	3100	3100	3100	3000	2900		17,58467
3.vzorek	3400	2250	2950	2600	3000	3300	3650	3300	2800		20,27402

4.vzorek	2700	2500	3850	2750	2500	2650	2650	2500	2800		19,93019
	2.série										
měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1.vzorek	3250	2600	3350	3300	2100	2100	2800	2800	2800		21,07031
2.vzorek	3750	2300	2550	2900	2000	3900	1300	1600	2000		29,11889
3.vzorek	2300	2500	2400	2400	2350	2200	2650	1700	2350		15,75842
4.vzorek	3200	3150	2550	2200	2100	2500	2300	1600	2900		22,17197
	3.série										
měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1.vzorek	2250	2650	2500	3800	1450	2100	2400	2000	2000		24,69098
2.vzorek	2000	1900	2300	1900	2000	2000	1900	2100	2200		11,54701
3.vzorek	2400	1950	2450	2100	2100	2500	2500	2500	2500		14,38151
4.vzorek	2800	1200	2000	2300	1750	2150	2000	1850	1950		20,13747
	4.série										
měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1.vzorek	2300	2250	1850	2550	2450	2300	1850	2250	2000		15,31407
2.vzorek	3100	3200	3150	2100	2900	2250	2700	2400	2300		20,07099
3.vzorek	2600	2000	2500	2650	2900	2300	2300	2600	2100		16,44911
4.vzorek	2600	2150	2400	2450	2600	4000	1750	2350	2350		24,04811
	5.série										
měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1.vzorek	2700	2150	2700	2700	2300	2000	2000	2100	2450		16,85995
2.vzorek	2000	2500	2700	2650	2600	2700	2350	2300	2700		15,07657
3.vzorek	2700	2900	3050	1900	3000	2200	2350	2650	2700		19,05778

4.vzorek	2650	2650	2650	2650	2700	3000	3000	1800	1900		20,0423
	6.série										
měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1.vzorek	3200	2000	3000	1700	3100	2550	2650	2650	2700		21,58868
2.vzorek	2300	2900	2250	2250	2500	2500	2500	2900	2750		15,60638
3.vzorek	3200	2700	2450	2600	2600	3200	2500	2750	2150		17,90502
4.vzorek	2450	3000	3000	3000	3050	2300	2150	2800	3800		21,61318

2.3.3 Vzorky z uhlíkových a čedičových vláken

V této fázi experimentu je možné přistoupit ke zpracovávání uhlíkových a čedičových vláken. Jejich vlastnosti jsou diametrálně odlišné od polyamidových, proto byly provedeny další změny týkající se především příváděcích pásů. Je nutné zmínit, že zpracovávaná vlákna jsou recyklovaná, což znamená, že nedosahují nejlepších možných kvalit těchto typů vláken. Obecné vlastnosti jsou popsány v rešeršní části práce. Volba těchto vlákenných surovin byla dána jejich tepelnou odolností a dalšími specifickými vlastnostmi. Při zpracovávání každé z vláken mělo svou roli. Staplová délka uhlíkových vláken zajišťovala dobré provázání vlákenné vrstvy. Čedičová vlákna umožňovala lepší zpracovatelnost obou (promísených) surovin. Musel však být zvolen takový poměr, který se bude dobře zpracovávat a zároveň zaručí co nejlepší fixaci (provázanost) vláken ve výchozím vzorku filtru.

Požadavky na výsledné filtrační materiály:

- dlouhodobá teplotní výdrž: 400°C
- krátkodobá teplotní výdrž: 600-800°C
- odolnost vůči působení vlhkosti a vůči chemickému působení spíše kyselému (vodní pára, oxidy síry)
- tlakový spád pouze v řádů jednotek Pa

Zdrojem informací bylo vedení firmy Novos Nová Paka, s. r. o. Došlo k realizaci pokusu in situ a bylo prokázáno, že filtr ze skleněných vláken vydrží v tomto prostředí asi dva týdny až měsíc, což ukazuje na nutnost použití materiálů odolnějších, než sklo.

Recyklovaná uhlíková vlákna

Vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken

Uváděné vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken byly zjišťovány na textilní fakultě TUL. Vzorky byly testovány při různých teplotách, buď v oxidačním prostředí, nebo v inertní atmosféře. Popisovány jsou zde pouze vybrané vlastnosti. Detailnější popis vlastností je možné si vyhledat ve zprávě R4449 (Vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken, jejich možné aplikace a vlastnosti nově vzniklých materiálů). [28]

Průměr vláken

Tab. 8. Průměry vláken v závislosti na teplotě recyklace [28]

d[μm]	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Modus	Medián	Šikmos t	špičatost
C Virgin	8,01	0,58	7,23	8,1	8,04	- 0,2	2,8
C 550 N2	6,78	0,31	4,52	6,83	6,8	- 0,14	2,75
C 550 vzduch	6,88	0,35	5,13	6,92	6,89	- 0,11	2,68
C 600	6,02	0,32	5,35	6,07	6,04	- 0,20	2,66
C 650	3,26	0,92	28,33	2,68	3,06	0,43	2,53

Pevnost recyklovaných vláken*Tab. 9. Pevnosti v tahu uhlíkových vláken [28]*

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Modus	Medián	Šikmost	špičatost
C Virgin	799,88	45,68	5,71	829,25	809,25	- 0,09	2,81
C 550 N2	1964,05	73,22	3,73	1969,96	1966,08	0,31	2,48
C 550 vzduch	2269,19	130,64	5,76	2258,92	2258,92	- 0,15	2,25
C 600	1763,12	152,01	8,62	1780,16	1780,16	0,13	2,44
C 650	1411,42	153,54	10,88	1358,59	1393,31	0,19	2,77

Modul pružnosti*Tab. 10. Modul pružnosti uhlíkových vláken [28]*

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Modus	Medián	Šikmost	špičatost
C Virgin	102,15	3,42	3,35	101,99	102,1	- 0,44	2,38
C 550 N2	114,85	1,94	1,69	115,1	114,94	0,13	2,4
C 550 vzduch	124,54	4,33	3,48	124,66	124,58	-0,5	2,7
C 600	120,42	4,33	3,59	120,84	120,57	- 0,14	2,82
C 650	119,94	6,89	5,75	121,93	120,63	- 0,15	2,52

Tažnost*Tab. 11. Tažnost uhlíkových vláken [28]*

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Modus	Medián	Šikmost	špičatost
C Virgin	0,8	0,05	6,67	0,82	0,81	- 0,27	2,86
C 550 N2	1,86	0,08	4,22	1,82	1,85	- 0,03	3,19
C 550 vzduch	1,99	0,11	5,69	1,99	1,99	- 0,28	2,73
C 600	1,65	0,11	6,79	1,64	1,645	0,16	2,42
C 650	1,46	0,07	5,08	1,43	1,45	0,06	2,47

Recyklovaná čedičová vlákna**Fyzikální vlastnosti***Tab. 12. Fyzikální vlastnost [28]*

Fyzikální vlastnosti	Čedičová vlákna
Objemová hmotnost	2900
Navlhavost	0,5
Modul pružnosti v tahu	100
Pevnost v tahu	1,85 - 2,15
Pevnost v tlaku	0,3

Změna pevnosti v tahu [%]*Tab. 13. Změna pevnosti v tahu [%][28]*

Při relativní pevnosti 100% za 64dny	91
Při teplotě 400 [°C]	82

Chemické vlastnosti*Tab. 14. Hodnoty chemických vlastností [28]*

Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod v H ₂ O [%]	99,8
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod v 2N HCL [%]	81,8

2.3.4 Úpravy stroje

Při prvních pokusech nastaly problémy s textilií (spun-bond) na příváděcích pásích. Vlákná se na ni přichytávala a zacpával se tak prostor před podávacím válečkem. Proto bylo nutné najít jiný, vhodný materiál pro tyto pásy. První variantou byla gumová síťka, u které se předpokládal nepřilnavý povrch. Ta však problémy s hromaděním vláken před strojem nevyřešila. Navíc docházelo k proklouzávání pásů. Dalším testovaným materiálem byl polyester (podšívkovina). U tohoto materiálu už nedocházelo k zachytávání ani ke kumulaci vláken před strojem. Objevil se právě opačný problém, vlákna po materiálu klouzala a nebyla přiváděna do stroje v dostatečném množství. Řešen je přišitím dřevěných latěk na podkladovou polyesterovou textilií v pravidelných intervalech. Díky tomu byla vlákna do stroje podávána pravidelně a zároveň nedocházelo k jeho ucpávání.

Změny se týkaly i pohonu příváděcích pásů. Doposud fungovali pouze na ruční pohon. Tento způsob byl nepraktický a zároveň se nadala zajistit kontinuita pohybu pásů. Pro pohon byly nataženy řemeny z hlavní hřídele, což velice usnadnilo regulaci jejich rychlosti.

Uvedená změna však více zatížila hlavní hřídel, která v průběhu výroby vlákenných vzorků praskla. Možným řešením bylo zajištění vlastního pohonu pro příváděcí pásy. Při jeho zapojení však nabylo možné zajistit kontinuitu pohybu (příváděcí pásy se pohybovaly krokově,) ani požadovanou rychlost (má být totožná s rychlostí rozvolňovacího válečku). Problém byl nakonec řešen vsazením gumové podložky, potažené textilií proti prokluzování, mezi dva díly prasklé hřídele. Následně byl stroj sestaven do původní podoby, tedy tak, že otáčením hlavní hřídele se pohybovaly příváděcí pásy. Zamezilo se dalšímu nadměrnému namáhání hlavní hřídele. V krajním případě docházelo k proklouznutí hřídele a ne k jejímu poškození.

2.3.5 Výroba vzorků

Při zpracování uhlíkových a čedičových vláken bylo nutné si uvědomit jejich výrazně rozdílné parametry. Uhlíková vlákna jsou v poměru k čedičovým velmi lehká. Při stejné váze je násobně vyšší objem u uhlíkových vláken. To bylo nutné brát v potaz při volbě procentuálního poměru surovin, který byl samozřejmě podmíněn výrobou souvislé vlákenné vrstvy. Stejně tak je diametrálně odlišná staplová délka těchto dvou typů vláken. U recyklovaných čedičových vláken se jedná o hodnoty v řádech milimetrů, to znemožňuje

výrobu pavučinky. U recyklovaných uhlíkových vláken byl velký rozsah naměřených hodnot (od 30 po 157 mm). Technologie Airlaid se využívá pro zpracování krátkých vláken (od 10 do 60 mm), proto bylo nutné zajistit zpracovatelnou (uváděnou) délku. Proces redukce délky usnadnila jedna z charakteristických vlastností uhlíkových vláken a tou je křehkost. Zmíněná vlastnost způsobila lámání suroviny na požadovanou délku při rozvolňování vlákenných svazků. Rozvolňování se provádělo na vyvíjeném zařízení. Při prvním průchodu vláken strojem docházelo k radikálnímu zkrácení vláken, při následujícím podávání vláken do stroje už se délka vláken příliš neměnila. Důkazem tohoto zjištění je měření staplových délek vláken v původní délce (měření *a*), před (měření *b*) a po druhém (měření *c*) průchodu strojem. U každého kroku bylo naměřeno 100 hodnot. Pro názornější zobrazení jsou data zpracována do tříd.

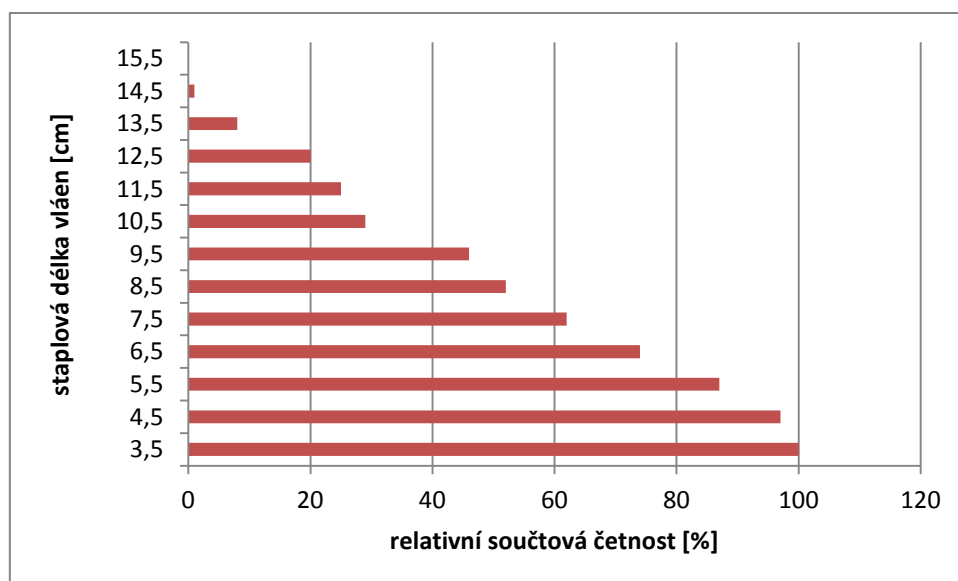
Původní délka vláken

Tab. 15. Naměřená staplová délka *a*.

Rozsah třídy [cm]	Třídni znak [cm]	četnost	Relativní součtová četnost
3 - 4	3,5	3	100
4 - 5	4,5	10	97
5 - 6	5,5	13	87
6 - 7	6,5	12	74
7 - 8	7,5	10	62
8 - 9	8,5	6	52
9 - 10	9,5	17	46
10 - 11	10,5	4	29
11 - 12	11,5	5	25
12 - 13	12,5	12	20
13 - 14	13,5	7	8
14 - 15	14,5	0	1
15 - 16	15,5	1	0

Tab. 16. Statistická data *a*.

průměr	8,57
směrodatná odchylka	3,066
medián	8,7
modus	5,3



Graf 2 Staplový diagram a.

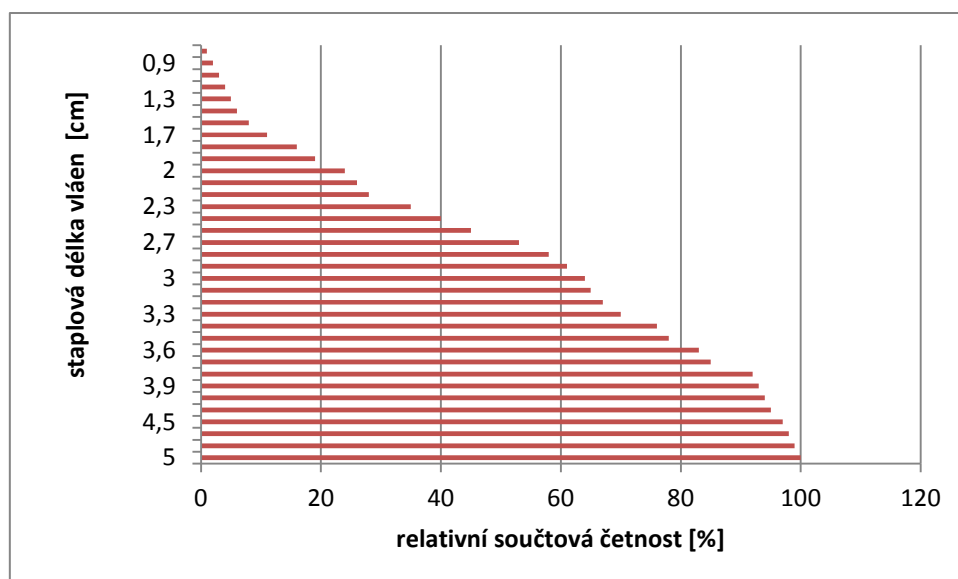
Délka vláken po rozvolňování

Tab. 17. Naměřená staplová délka b.

Rozsah třídy [cm]	Třídni znak [cm]	četnost	Relativní součtová četnost
0,5 - 1	0,75	2	100
1 - 1,5	1,25	4	98
1,5 - 2	1,75	13	94
2 - 2,5	2,25	21	81
2,5 - 3	2,75	21	60
3 - 3,5	3,25	15	39
3,5 - 4	3,75	17	24
4 - 4,5	4,25	2	7
4,5 - 5	4,75	5	5
		100	

Tab. 18. Statistická data b.

průměr	2,8
měrodatá odchylka	1,147
median	2,8
modus	2,7



Graf 3 Staplový diagram b.

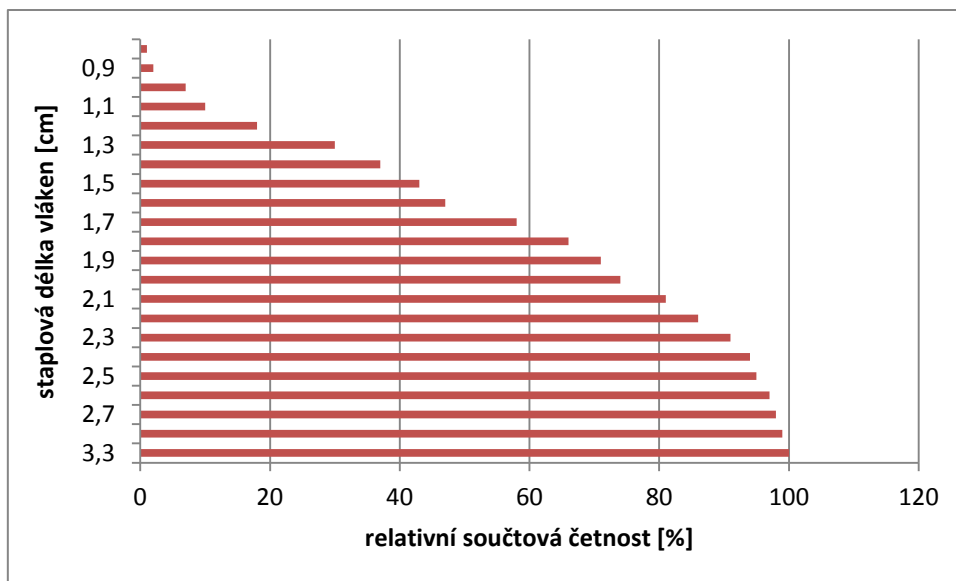
Délka vláken po vícenásobném průchodu strojem

Tab. 19. Naměřená staplová délka c.

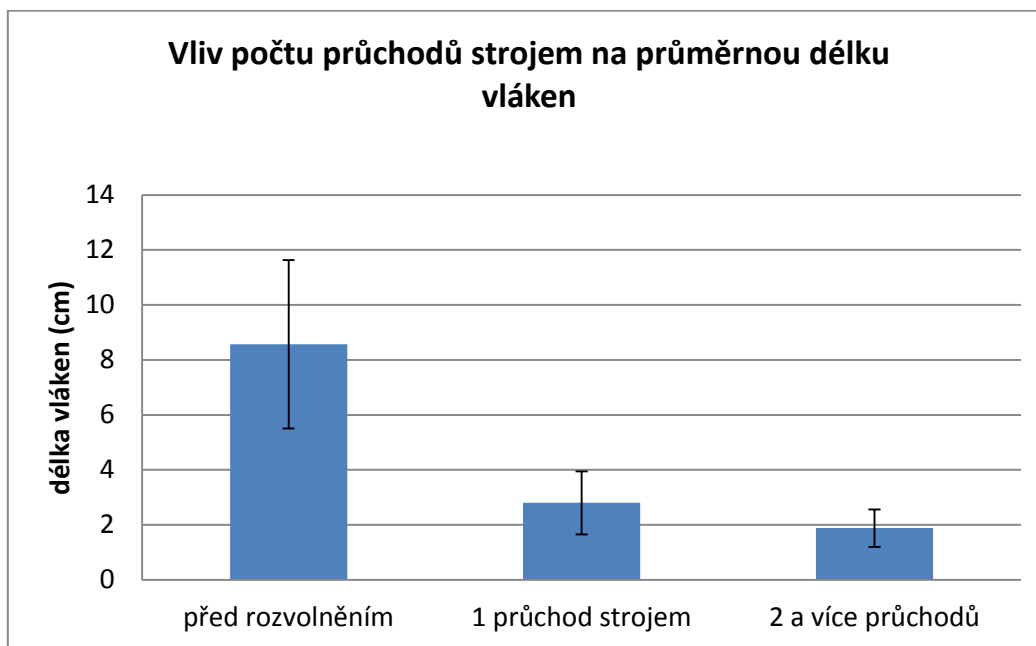
Rozsah třídy [cm]	Třídni znak [cm]	četnost	Relativní součtová četnost
0,5 - 1	0,75	4	100
1 - 1,5	1,25	32	96
1,5 - 2	1,75	34	64
2 - 2,5	2,25	23	30
2,5 - 3	2,75	5	7
3 - 3,5	3,25	2	2
		100	

Tab. 20. Statistická data c.

průměr	1,88
měrodatá odchylka	0,683
median	1,8
modus	1,3



Graf 4 Staplový diagram c.



Graf 5 Vliv počtu průchodů strojem na průměrnou délku vláken

Testování vhodného poměru

Pro první testování byl zvolen náhodný poměr vláken. Tento vzorek byl vyroben především pro hledání vad v procesu výroby. U dalšího testování byly zvoleny poměry 25 : 75, 50 : 50 a 75 : 25. Pro vytvoření vzorků uvedených poměrů se museli volit různé gramáže. Důvodem jsou již popisované rozdílné hmotnosti vláken. S vyšším poměrem čedičových vláken roste

váha vzorku. Ta se zjišťovala pouze proto, aby byl přesně dodržen stanovený poměr vláken. První zhotovené vzorky byly jednovrstvé a měly ukázat na správný poměr vláken. Bylo zjištěno, že nejlepší vzorek byl vyroben z poměru vláken 50 : 50. Zároveň se při výrobě vlákenné vrstvy snáze zpracovává poměr vláken, ve kterém je více uhlíkových vláken. V důsledku toho byly vyrobeny další vzorky s poměrem 60% uhlíku a 40% čediče a 70% uhlíku a 30% čediče. Na druhém poměru (70 : 30) nebyl znatelný rozdíl od již vytvořeného vzorku s nejvyšším obsahem uhlíkových vláken. Proto nebyl zařazen do měření. Druhý poměr vláken (60 : 40), byl nejlépe zpracovatelný a výchozí vlákenná vrstva měla nerovnoměrnější vzhled. Díky tomu byl zmiňovaný poměr zařazen do hlavního testování vzorků.

Tab. 20. Poměry vláken

Vzorek	Poměr čedič : uhlík	Hmotnost vzorku
A	25 : 75	1,5g
B	40 : 60	1,5g
C	50 : 50	2g
D	75 : 25	2g
E	náhodný	

Zpevňování vlákenných vrstev

Pro vytvoření samostatné vlákenné vrstvy bylo nutné pavučinku - výchozí produkt airlaidu zpevnit vpichováním. Zpočátku byly vzorky vkládány do stroje na podkladové textilii (spunbond). Nebylo však možné následné sejmutí vlákenné vrstvy. Proto bylo vyrobeno lněné rouno, na které se pavučinka přenesla. Po průchodu strojem však došlo ke znehodnocení zpevňovaného vzorku. Výsledné řešení bylo kombinací obou předchozích. Na lněné rouno se vzorek pokládal i s podkladovou textilií. Zároveň byla snížena hodnota hloubky vpichu z 8 na 5. Takto zpevňované vlákenné vrstvy bylo možné snímat z podkladových materiálů a dál s nimi pracovat. Pro zlepšení vlastností byly vyráběny vzorky dvouvrstvé, což znamenalo, že každá vrstva (se stejným poměrem) byla zpevněna samostatně a následně byly vpichováním připevněny k sobě.

Prodyšnost

U každého ze vzorků bylo naměřeno (na zařízení Metefem FF-12/A) 10 hodnot na různých místech. Měření probíhalo za standardních podmínek a při nastavení stanovených normou

(tlak byl nastaven na hodnotu 20 Pa). Hodnoty jsou však snímány velmi lokálně na ploše kruhu s průměrem 1,1 cm. Výsledné hodnoty měly ukázat na stejnoměrnost vzorků.

Vzorek A

Měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Hodnoty	850	850	750	700	750	700	775	850	850	825

Vzorek B

Měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Hodnoty	725	750	775	775	800	850	775	825	825	800

Vzorek C

Měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Hodnoty	750	825	850	700	625	675	675	750	800	800

Vzorek D

Měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Hodnoty	700	600	650	575	625	700	700	700	625	650

Vzorek E

Měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Hodnoty	750	700	775	775	700	675	570	750	700	600

Úlety

Měřením úletů je zjišťováno jak jsou vlákna ve filtru fixována. Neprovázaný vláknenný materiál je za působení tlaku na filtr odstraněn. Měření probíhalo (na zařízení DFT – 4) 60 sekund při rychlosti proudění 2,5 m/s. Testovaná plocha filtru byla 33 cm². Pro každé měření se měnil tlak v závislosti na kvalitě filtru. Pokus probíhal tak, že byla zjištěna váha

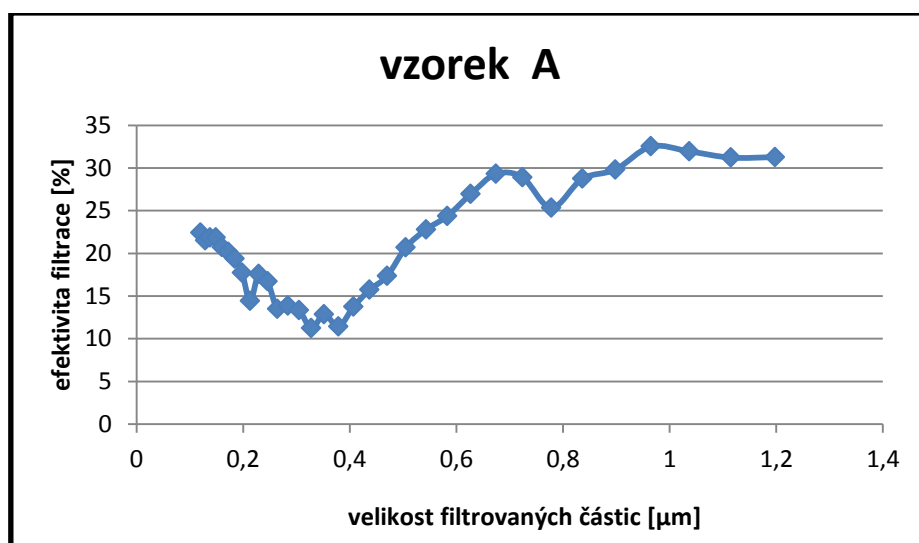
papírového filtru za vzorkem před spuštěním testu a po něm. Rozdíl těchto dvou hmotností bylo množství úletů. Nejvyšší hodnoty se předpokládaly u vzorků s velký množstvím čedičových vláken z důvodu jejich malých rozměrů a špatně fixace ve vlákenné vrstvě.

Tab. 30. Úlety

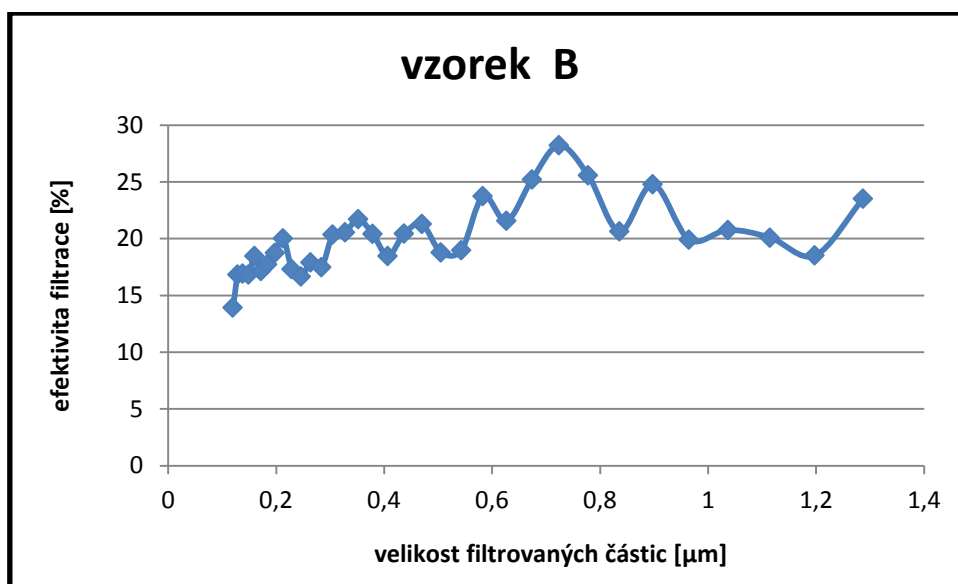
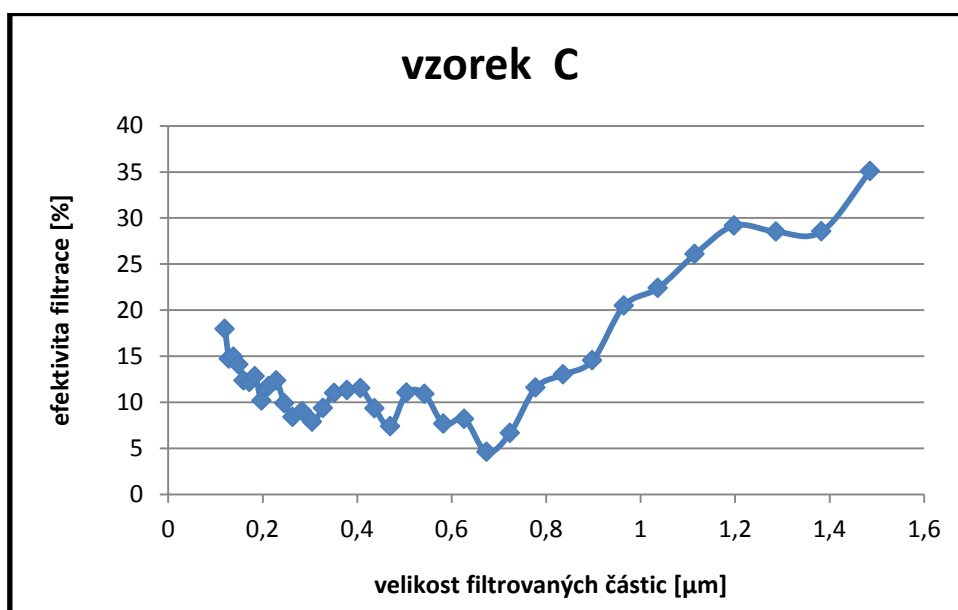
Vzorek	Váha papírového filtru [g] před testem : po testu	Váha testovaný vzorků	Tlak [Pa]	Úlety [%]
A	2,0125 - 2,0130	0,199g	95	0,25
B	2,0130 - 2,0136	0,501	84	0,12
C	2,0136 - 2,0139	0,573	116	0,05
D	2,0139 - 2,0147	1,041	132	0,08
E	2,0147 - 2,0150	0,720	121	0,04

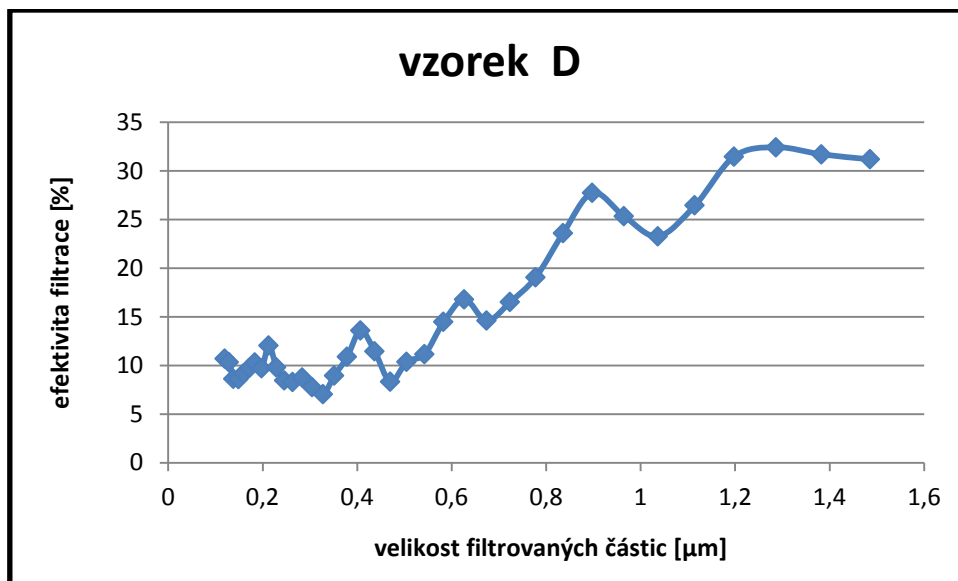
Účinnost filtrace

Jedná se o měření zjišťující efektivitu filtrace. Podle výsledků tohoto testu je možné filtry zařadit do filtračních tříd. Testování probíhá na zařízení (MFP 1000 HEPA) postup a parametry měření jsou uvedeny v rešeršní části práce. Na následujících grafech je znázorněna efektivita filtrace v závislosti na velikosti filtrovaných částic. Pro spalínové filtry je podstatná procentuální účinnost zachycení částic o rozměrech 0,4 - 0,5 μm . U testovaných vzorků efektivita filtrace částic uváděných rozměrů klesá. Pro filtrované částice větší než 1,5 μm se efektivita filtrace výrazně zvyšuje.

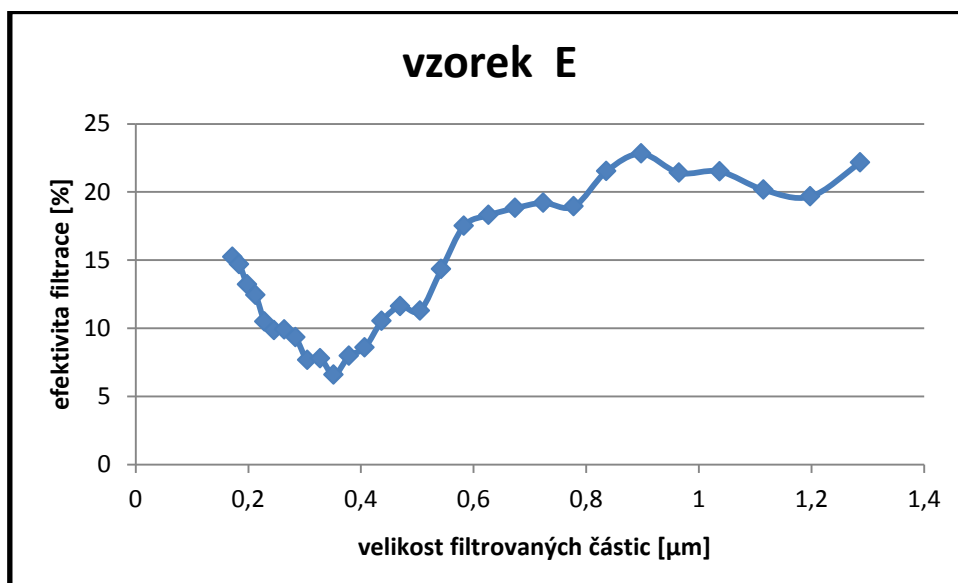


Graf 6 Efektivita filtrace vzorek A

*Graf 7 Efektivita filtrace vzorek B**Graf 8 Efektivita filtrace vzorek C*



Graf 9 Efektivita filtrace vzorek D

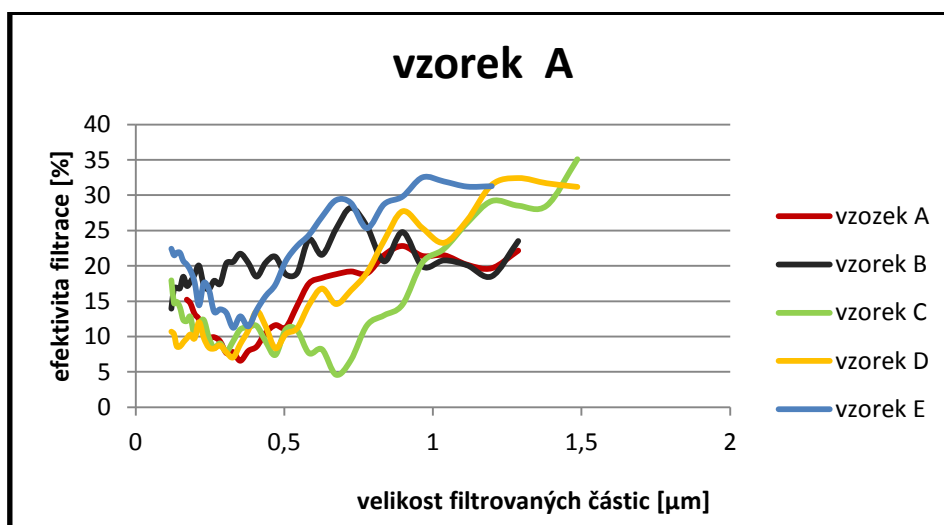


Graf 10 Efektivita filtrace vzorek E

Porovnání naměřených hodnot a vzorků

Celkové hodnocení efektivity filtrace vychází z předpokladu hrubého filtru s velkou prodyšností a malou efektivitou záchytu. Všechny porovnávané vzorky spadají do filtrační třídy G3 podle normy EN 779. Relativně malá procenta účinnosti pro malé částice tedy nejsou na závadu. Procentuální úspěšnost záchytu částic do velikosti $0,5 \mu\text{m}$ ve vesměs pohybuje okolo 10%. Pouze pro vzorek B (60% uhlíkových vláken : 40% čedičových vláken) se

hodnoty efektivita filtrace pohybují okolo 20%. Ani tyto výsledky však nelze považovat za vhodné pro spalínové filtry. Testované vzorky by mohly být zařazeny pouze do filtračních tříd pro hrubou filtraci.



Graf 11 Porovnání vzorků

3 Závěr

Cílem této diplomové práce byla realizace laboratorního zařízení airlaid, tak aby bylo možné vyrobit homogenní vláknennou vrstvu z recyklovaných uhlíkových a čedičových vláken. Plánované využití materiálu je pro hrubou filtraci horkých spalin.

Teoretická část je zaměřená na filtraci s konkrétnějším zaměřením na filtraci vzdušnou. Jsou zde popsány parametry, mechanismy a druhy filtrace, stejně tak, jako základní výrobní technologie, které je možné pro výrobu filtrů využít.

Experimentální část je složena ze dvou kapitol. V první je popisován průběh a důvody konstrukčních změn laboratorního systému airlaid, které byly provedeny. Pro první testování a úpravy byla použita polyamidová vlákna, aby se mohly snáze sledovat změny nastavení parametrů stroje. V průběhu vytváření prvních vzorků (z polyamidových vláken na podkladové textilií) byly provedeny zásadní konstrukční změny zařízení, které zahrnovaly i nastavení optimálních parametrů. Ve druhé kapitole je popsán postup při výrobě vzorků z uhlíkových a čedičových vláken. K jejich zhotovení bylo třeba provést další konstrukční změny laboratorního zařízení s ohledem k jejich specifickým vlastnostem. Závažným zjištěním bylo, že zkonstruované zařízení zkracuje dlouhá uhlíková vlákna (až 160 mm) na takovou délku, která je pro technologii airlaid vhodná (10 - 60 mm), nicméně se tím zhoršují mechanické vlastnosti textilie. Sledovali jsme vliv kombinace čedičových a uhlíkových vláken na zpracovatelské i výsledné vlastnosti textilie. Ukázalo se, že kombinace těchto vláken je vhodná z ekonomického pohledu, ale i pro snadnější výrobu vláknenné vrstvy. Vlákna čediče usnadňují zpracování vláken ve stroji a uhlíková vlákna zajišťují soudržnost vláknenné vrstvy. Pro zpevnění vláknenné vrstvy byla použita technologie vpichování (vzhledem k požadavkům na tepelnou odolnost lze těžko uvažovat o jiné technologii). Vzorky se však při použití této technologie lámaly, docházelo k jejich posunu ve vrstvě a tím i ke snižování plošné hmotnosti. Problém byl řešen vložením podkladové vrstvy (lněné rouno) do vpichovacího zařízení. Tím se zabezpečila vlákna proti posunu a přebytečná lněná vlákna, která zůstala ve vzorku po sejmutí z rouna byla vypálena. Měřená data a jejich konkrétní výsledky jsou zpracována v experimentu. Podle výsledků těchto měření všechny porovnávané vzorky spadají do filtrační třídy G3 podle normy EN 779.

Z hlediska využití pro filtrační materiály je možné v určitém poměru přidávat čedičová vlákna do směsi s uhlíkovými a tím snížit výslednou cenu, nicméně získané vzorky mají stále velmi malou pevnost, kterou navíc pravděpodobně nelze zvýšit chemickým, nebo termickým

pojením. Jedinou možností je zvýšit množství mechanicky spojených vláken, což ale bude zvyšovat tlakový spád filtru. S tím je nutné počítat pro další aplikace. V podstatě není možné takové filtry používat v systému bez nuceného odtahu spalin.

Pro případný další vývoj filtrů, by bylo vhodné dále testovat poměry vlákenných surovin a vrstvení výchozích vzorků. Zajímavá by byla možnost vrstvení vzorků s různými poměry vláken hledání optimálních kombinací.

LITERATURA

- [1] Viden, V.: *Chemie ovzduší. 1. Vyd.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. ISBN 80-7080-571-4
- [2] Krčma, R.: *Teorie netkaných textilií. Liberec: VŠST, 1986*
- [3] Hrůza, J.: Přednáška - *Filtrace a filtrační materiály*, Liberec, TUL, KNT
- [4] Jelínek, L. a kol.: *Desalinační a separační metody v úpravě vody. 1. Vydání.* Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2009, ISBN 978-80-7080-705-7.
- [5] Brown, R. C.: *Air Filtration: An integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous filters.* 1st ed. Exeter: Wheatons Ltd, 1993. ISBN 0-08-041274-2
- [6] Wakeman, R. J. and Tarleton, E. S.: *Filtration: Equipment Selection, Modelling and Process Simulation.* 1st ed. Elsevier Science Ltd., Oxford, 1999. ISBN 1-85617-345-3
- [7] Hasal, P., Scheiber, I., Šnita, D a kol.: *Chemické inženýrství*, Praha: VŠCHT Praha, 2007
- [8] Poláková, I.: *Bakalářská práce - Čedičová vlákna pro technické aplikace*, TUL 2010
- [9] Hrůza, J.: Přednáška Automobilové filtry hotI., TUL
- [10] Navrátil, P., *Bakalářská práce - Využití aktivního uhlí v procesu čištění spalin*, VUT Brno, 2012
- [11] Šidlof, P., Hrůza, J., Hrabák, P.: *Filtrace a katalytický rozklad nežádoucích složek v odpadních vzdušninách a spalínách pomocí nanovláknenných*
<http://artec.tul.cz/index.php?lang=cs&content=upload/seminar/ARTEC-sidlof.pdf>
- [12] Jirsák, O., Kalinová, K.: *Netkané textilie.* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003. ISBN 80-7083-746-2
- [13] Vejvoda, J., Machač, P., Buryan, P., *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*, Praha: VŠCHT Praha, 2003
- [14] článek : *fixační materiály pro textilní výrobu* - Freudenberg Vilene s.r.o. , dostupné na World Wide Web ke dni 20.12,2012:
http://www.vil.ene.cz/villene/pruvodce_fixaci/mezipodsivky06.html
- [15] Hornychová, S., *Diplomová práce - Vzduchová filtrace - kabinové filtry*, TUL 2010
- [16] Tomková, B.: přednáška: *Vláknové kompozity - vlastnosti vystužujících vláken II*
<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-16/12-55-07.pdf>
- [17] Heidenreich, S., 2013. Hot gas filtration – A review. *Fuel*, 104 (2013), pp. 83 – 94.
- [18] článek : dostupné na World Wide Web ke dni 17.12,2012
<http://web.utk.edu/~mse/Textiles/Spunbond%20Technology.htm>

- [19] článek :dostupné na World Wide Web ke dni 12.1.2013
<http://www.freepatentsonline.com/6932923.html>
- [20] článek :dostupné na World Wide Web ke dni 17.12.2012
<http://www.maxifashion.cz/articles/78/>
- [21] Moučková, E., přednášky - Předání - základní technologické stupně, Liberec TUL
- [22] <http://web.utk.edu/~mse/Textiles/Dry%20Laid%20Nonwovens.htm>
- [23] článek :dostupné na World Wide Web ke dni 20.12.2012
<http://www.inda.org/events/training/reading/Airlaid%20Pulp%20Nonwoven%20Primer.pdf>
- [24] článek :dostupné na World Wide Web ke dni 8.1.2013
http://www.nonwovens-industry.com/issues/2012-10/view_features/airlaid-market-positioned-for-progress/
- [25] článek :dostupné na World Wide Web ke dni 10.1.2013
<http://www.google.com/patents/US6195842>
- [26] článek :dostupné na World Wide Web ke dni 10.1.2013
<http://www.google.com/patents/US6267252>
- [27] Nabídka komerčního testování filtračních vlastností, Ústav pro nanomateriály
- [28] Cihelník, K.:Vlastnosti uhlíkových vláken, jejich možné aplikace, a vlastnosti nově vzniklých materiálů, R4449, Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.,Praha 2008
- [29] Medvedyev, O., Tsybulya, Y., 2005. Basalt use in hot gases filtration. Filtration + Separation, Elsevier Ltd., 2005. ISSN 0015-1882/05

Seznam obrázků

Obr. 1 Přehled tlakových membránových procesů.

Obr. 2 Povrchová filtrace a hloubková filtrace

Obr. 3 Filtrační koláč

Obr. 4 Mechanismy filtrace

Obr. 5 Přehled velikosti částic ve vzduchu

Obr.6. Rozdělení vzduchových filtrů podle evropské normy

Obr. 7. Mokrý technologie filtrace

Obr.8. Výroba vpichované textilie

Obr.9. Zařízení pro vpichování textilií(používané v experimentu)

Obr.10 Schéma technologie spun-bond

Obr. 11. Schéma technologie melt-blown

Obr.12. Elektrostatické zvlákňování

Obr.13. Technologie airlaid

Obr. 14. Výchozí stav zařízení

Obr. 15. Schéma výchozího zařízení

Obr. 16. Schéma konečného stavu zařízení

Obr. 17. Vrstva tvořená při minimálním tahu

Obr. 19. Odváděcí pás

Obr. 20. Schéma odváděcího pásu

Obr. 21. Kovová konstrukce

Obr. 22. Přiváděcí pásy

Obr. 23. Místo korekce

Obr. 24. Podávací váleček

Obr. 25. Pevný kryt

Obr. 26. Pohyblivé kryty

Obr. 27. Zařízení Metefem FF-12/A

Obr. 28. Zařízení DFT – 4

Obr. 29. Zařízení MFP 1000 HEPA

Obr. 30. Rozložená vlákna před vstupem do stroje

Obr. 31. Výchozí pavučinka

Seznam tabulek

Tab. 1. Tepelná a chemická stabilita vybraných vláken

Tab.2. Testovací procesy pro vzdušnou filtraci

Tab. 3. Parametry měření na Metefem FF-12/A

Tab. 4. Parametry měření na DFT – 4

Tab. 5. Parametry měření na MFP 1000 HEPA

Tab. 6. Výsledky měření prodyšnosti

Tab. 7. Výsledky měření jednotlivých vzorků

Tab. 8. Průměry vláken v závislosti na teplotě recyklace

Tab. 9. Pevnosti v tahu uhlíkových vláken

Tab. 10. Modul pružnosti uhlíkových vláken

Tab. 11. Tažnost uhlíkových vláken

Tab. 12. Fyzikální vlastnost

Tab. 13. Změna pevnosti v tahu [%]

Tab. 14. Hodnoty chemických vlastností

Tab. 15. Naměřená staplová délka a

Tab. 16. Statistická data a.

Tab. 17. Naměřená staplová délka b

Tab. 18. Statistická data b.

Tab. 19. Naměřená staplová délka c.

Tab. 20. Statistická data c.

Tab. 20. Poměry vláken

Tab. 30. Úlety

Seznam grafů

Graf.1 Znázornění rozptylů prodyšnosti

Graf 2 Staplový diagram a.

Graf 3 Staplový diagram b.

Graf 4 Staplový diagram c.

Graf 5 Vliv počtu průchodů strojem na průměrnou délku vláken

Graf 6 Efektivita filtrace vzorek A

Graf 7 Efektivita filtrace vzorek B

Graf 8 Efektivita filtrace vzorek C

Graf 9 Efektivita filtrace vzorek D

Graf 10 Efektivita filtrace vzorek E

Graf 11 Porovnání vzorků